



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

PROYECTO FIN DE CARRERA

MONITORIZACIÓN DE UN LECHO FUIDIZADO MEDIANTE ACELEROMETRÍA

Autor: Mario Velasco Fernández

Tutor: Jesús Gómez Hernández

Leganés, octubre de 2013.

ÍNDICE GENERAL

1.- INTRODUCCIÓN.....	6
1.1- Motivación.....	7
1.2- Objetivos.....	8
1.3- Fases del desarrollo del proyecto.....	9
2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	10
2.1- Definición de fluidización.....	11
2.2- Tipos de fluidización.....	14
2.3- Características generales de los lechos fluidizados.....	16
2.4- Aplicaciones de los lechos fluidizados.....	17
3- DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO.....	18
3.1- Descripción del reactor.....	19
3.2- Descripción sistema de medida.....	23
3.3- Descripción de los ensayos.....	27
4- TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES.....	29
4.1- Teorema de Nyquist.....	30
4.2- Filtros paso-bajo y paso-alto.....	31
4.3- Desviación típica.....	33
4.4- Transformada de Hilbert. Envolvente de una señal.....	34
4.5- Análisis en el dominio frecuencia - PSD.....	37
5.- DETERMINACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS SENSORES DE MEDIDA.....	38
5.1- Introducción.....	39
5.2- Criterio de validación de las medidas de vibración.....	41
5.3- Primera disposición de soportes y sensores.....	42
5.4- Segunda disposición de soportes y sensores.....	45
5.5- Tercera disposición de soportes y sensores.....	48
5.6- Procedimiento de medida definitivo.....	50

Índice

6.- RESULTADOS OBTENIDOS (LECHO DE 70mm DE ALTURA).....	52
6.1- Resultados en el dominio del tiempo.....	53
6.2- Resultados en el dominio de la frecuencia.....	56
6.3- Análisis de los resultados.....	59
6.4- Conclusiones.....	63
7.- RESULTADOS OBTENIDOS (LECHO DE 160mm DE ALTURA).....	65
7.1- Resultados en el dominio del tiempo.....	66
7.2- Resultados en el dominio de la frecuencia.....	68
7.3- Análisis de los resultados.....	71
7.4- Conclusiones.....	75
8.- CONCLUSIONES.....	76
BIBLIOGRAFÍA.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.1- Cálculo de la velocidad mínima de fluidización.....	12
2.2.1- Tipos de fluidización.....	14

3- DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

3.1.1- Esquema del reactor.....	19
3.1.2.- Plano: Plénum-distribuidor-lecho y detalle de los tuyeres.....	20
3.1.3.- Zona inferior del distribuidor.....	21
3.2.1.- Material utilizado.....	23
3.2.2.- Esquema general de la instrumentación utilizada.....	24

4- TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES

4.2.1.- Función de transferencia de un filtro paso-bajo Chebyshev tipo I.....	31
4.4.1.- Envolvente de una señal.....	34
4.4.2.- Resultado de la Transformada de Hilbert	36

5.- DETERMINACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS SENSORES DE MEDIDA

5.1.1.- Disposición de sensores de presión y sensores de aceleración en distribuidor....	40
5.2.1.- Ejemplo de PSD.....	41
5.3.1.- Primera disposición de soportes y sensores.....	42
5.3.2.- Comparativa entre sensores del lecho (1ª disposición).....	43
5.4.1.- Segunda disposición de soportes y sensores.....	46
5.4.2.- Comparativa entre sensores del lecho (2ª disposición).....	47
5.5.1.- Tercera disposición de soportes y sensores.....	48
5.5.2.- Comparativa entre sensores del lecho (3ª disposición).....	49
5.6.1.- Procesado de señales de presión y acelerometría.....	51

6.- RESULTADOS OBTENIDOS (LECHO DE 70mm DE ALTURA)

6.1.1.- Evolución de la presión y vibración en función de la velocidad del aire.....	54
6.2.1.- PSD. Sensores: Presión Plénum y Presión Lecho. Altura del lecho: 70mm.....	56
6.2.2.- PSD. Sensores: Acelerómetros Lecho. Altura del lecho: 70mm.....	57
6.2.3.- PSD. Sensores: Acelerómetros Distribuidor. Altura del lecho: 70mm.....	58

Índice

6.3.1.- Condición de caudal: 100 l/min. (Sin fluidización).....	60
6.3.2.- Condición de caudal: 250 l/min. (Fluidización con burbuja estrecha).....	61
6.3.3.- Condición de caudal: 450 l/min. (Fluidización con burbuja gruesa).....	62

7.- RESULTADOS OBTENIDOS (LECHO DE 160mm DE ALTURA)

7.2.1.- PSD. Sensores: Presión Plénum y Presión Lecho. Altura del lecho: 160mm.....	68
7.2.2.- PSD. Sensores: Acelerómetros Lecho. Altura del lecho: 160mm.....	69
7.2.3.- PSD. Sensores: Acelerómetros Distribuidor. Altura del lecho: 160mm.....	70
7.3.1.- Condición de caudal: 100 l/min. (Sin fluidización).....	72
7.3.2.- Condición de caudal: 250 l/min. (Fluidización con burbuja estrecha).....	73
7.3.3.- Condición de caudal: 450 l/min. (Fluidización con burbuja gruesa).....	74

1.- INTRODUCCIÓN:

1.1- MOTIVACIÓN:

El departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la Universidad Carlos III ha desarrollado una serie de estudios sobre el comportamiento de lechos fluidizados en reactores químicos. Para ello dispone de varias réplicas de reactores, sobre las que se llevan a cabo medidas de presión, temperatura, vibración, etc.

Uno de los aspectos que estudia la Universidad es poder determinar el grado de fluidización que tiene el lecho, a través de las señales que proporciona una serie de sensores convenientemente colocados; es decir, a través de una monitorización del reactor químico.

Típicamente, las monitorizaciones realizadas a reactores químicos reales utilizan sensores de presión. Las señales obtenidas a través de estos sensores proporcionan información fiable acerca del grado de fluidización del lecho. Además, existen múltiples estudios que han definido experimentalmente la respuesta dada por estos sensores a los diferentes estados de fluidización. El inconveniente que presenta este tipo de sensores es que deben instalarse en contacto directo con el interior del reactor. Ello supone una limitación importante a la hora de utilizar esta tecnología. La utilización de sensores de vibración supondría las siguientes ventajas:

- ✦ Para realizar una medida de presión en el reactor es necesario que exista un punto de acceso al interior del mismo. Los sensores de vibración no necesitan ser situados en el interior del reactor, por lo que no sería necesario realizar perforaciones en éste. Esta ventaja puede tener mucha importancia en determinados tipos de reactores.
- ✦ El exceso de vibración en el reactor puede ser un problema en sí mismo. La utilización de sensores de vibración permite vigilar la condición de vibración protegiendo la estructura. Además, pueden utilizarse para la vigilancia de otros fenómenos, como falta de rigidez en la estructura, desprendimientos de piezas en el interior del reactor, etc.

El presente proyecto estudiará la posibilidad de monitorizar un reactor químico mediante sensores de vibración. Actualmente, no se realiza este tipo de monitorización sobre reactores químicos, y los estudios realizados al respecto son escasos. Se tratarán de establecer las posibles equivalencias entre las medidas realizadas con sensores de presión y de vibración. Para ello se realizará la monitorización de un modelo de reactor a escala, del laboratorio de la Universidad, utilizando ambos tipos de sensores. Se realizará una serie de pruebas destinadas a determinar hasta qué punto las medidas de vibración proporcionan una información equiparable a la proporcionada por los sensores de presión.

1.2- OBJETIVOS:

El objetivo fundamental de este proyecto es validar la utilización de sensores de vibración (acelerómetros) para la monitorización de un reactor químico con lecho fluidizado. La manera habitual de caracterizar los lechos fluidizados es mediante sensores de presión. Por ello, se llevará a cabo una caracterización del lecho objeto del estudio, por medio de sensores presión, y, en paralelo se tratará de hacer lo mismo mediante acelerómetros.

Para ello se han planteado una serie de objetivos, a partir de los cuales se deducirán las correspondientes conclusiones. Los objetivos planteados son los siguientes:

- ✦ Definir la metodología empleada en la adquisición de los datos de acelerometría. Para ello se recurrirá a la experiencia de estudios previos, pero también se realizarán modificaciones sobre el planteamiento inicial, con el objeto de adecuarse a las características del reactor.
- ✦ Estudiar los datos obtenidos mediante los sensores de vibración. Fundamentalmente, se utilizará como referencia los datos obtenidos con los sensores de presión.
- ✦ Estudiar los resultados que puedan proporcionar acelerómetros situados en dirección vertical para la monitorización del lecho fluidizado. Hasta el momento, los estudios que se han realizado muestran resultados de acelerómetros que miden en dirección horizontal.

1.3- FASES DEL DESARROLLO DEL PROYECTO:

Las fases establecidas desde un principio para la ejecución de este proyecto son las siguientes:

1. Instalación del reactor químico, de acuerdo a unos parámetros que se definirán de forma concreta. Introducción, en el reactor, del material que compone el lecho. Instalación de las cadenas de medida de presión y aceleración.
2. Determinación de las condiciones de caudal. Experimentalmente, se calculará el caudal máximo que puede soportar el lecho sin que se produzca transporte neumático. A partir de este valor de caudal, se determinarán una serie de escalones que tienen por objeto generar todos los tipos de fluidización que pueden darse en el lecho.
3. Definición de la metodología empleada en la adquisición de las señales provenientes tanto de los sensores de presión como de vibración.
4. Determinación de una primera disposición de los sensores de vibración. Realización de una primera medida. A partir de los resultados que se obtengan en ella se valorará la conveniencia de realizar modificaciones sobre el embridamiento del reactor a la pared y en la situación de los sensores de vibración.
5. Modificación, si procede, de la morfología del lecho y de la situación de los acelerómetros, y obtención de las condiciones de medida definitivas, que proporcionen los mejores resultados.
6. Establecidas las condiciones de medida definitivas, adquisición y registro de medidas en todas las condiciones establecidas anteriormente en el punto 2. Valoración de los resultados obtenidos.
7. Utilizando las mismas condiciones de medida, se realizarán las mismas medidas utilizando un lecho de mayor altura. Comparación de los resultados obtenidos con los lechos de diferentes alturas.
8. Estudio de las conclusiones del trabajo.

2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS:

2.1- DEFINICIÓN DE FLUIDIZACIÓN:

La fluidización se define como el fenómeno que se produce al hacer pasar un fluido a través de partículas sólidas con la suficiente velocidad como para que ambas sustancias se mezclen de forma homogénea, comportándose como un fluido. Este comportamiento tiene como resultado la generación de burbujas en el interior del lecho. Estas burbujas favorecen el contacto entre partículas, lo cual favorece el intercambio térmico, las reacciones químicas, etc. La utilización controlada de este fenómeno tiene múltiples aplicaciones industriales.

La “**velocidad mínima de fluidización**” (U_{mf}) se define como la velocidad mínima que debe tener el fluido que pasa a través de las partículas sólidas para que se produzca el fenómeno de la fluidización. En la literatura existen distintas correlaciones teóricas para determinar el valor de la velocidad de mínima fluidización. Sin embargo, en este proyecto se medirá experimentalmente esta velocidad, siguiendo el artículo de Wilkinson (1995).

A continuación se expone uno de los métodos teóricos a través de el cual se obtiene la velocidad mínima de fluidización, definido por Wilkinson (1995). Este método de cálculo es puramente teórico y está basado en la posibilidad de calcular el incremento de presión que se produce entre la zona inferior y la zona superior del lecho, cuando circula a través de él un fluido:

El paso del fluido a través del lecho genera un incremento de presión entre la zona inferior y superior del lecho, que depende de la densidad y el tamaño de las partículas, la densidad del fluido y las dimensiones del lecho. Mientras el lecho se encuentra en reposo (no fluidizado) la caída de presión aumenta de forma directamente proporcional a la velocidad del fluido. Cuando el lecho se encuentra fluidizado, la caída de presión no depende de la velocidad, manteniéndose constante. Las ecuaciones que definen esta evolución son las siguientes:

La ecuación correspondiente a un lecho en reposo (no fluidizado) es:

$$\Delta P = A \cdot u$$

La ecuación correspondiente a un lecho fluidizado es:

$$\Delta P = B$$

Por lo que la ecuación que define la evolución de la presión en función de la velocidad del aire (u) será:

$$\Delta P = A \cdot u + B$$

Para obtener la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), se calcula el punto de intersección entre las dos primeras ecuaciones:

$$A \cdot U_{mf} = B \quad \text{De la que se deduce:} \quad U_{mf} = \frac{B}{A}$$

En el presente proyecto se calculará la velocidad mínima de fluidización, característica del lecho objeto de estudio, de forma experimental. Para ello se considerará que existe fluidización cuando comience a detectarse la mínima variación de presión producida por las burbujas.

Las medidas de presión realizadas no son continuas, se han realizado con valores de velocidad del aire discretos. Por ello es necesario realizar el siguiente cálculo (Wilkinson, 1995).

En cada condición de medida, se realizará un cálculo de la desviación típica de la señal de presión (σ_p). La manera de realizar este cálculo se explica en el apartado 4.3. En aquellas condiciones en las que no existe fluidización, no se producirán oscilaciones de presión, y la desviación típica será 0. En las condiciones en las que sí existe fluidización, la desviación típica adquiere un valor relacionado con los procesos dinámicos de generación de burbujas dentro del lecho. Este valor, aunque no es exactamente lineal, sí mantiene una cierta proporcionalidad respecto a la velocidad del aire. Si se representan los valores de desviación típica de todas las condiciones de medida, se obtiene su evolución, que nos permite determinar la condición de velocidad del aire en la que comienza a producirse la fluidización.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de la forma de realizar este cálculo:

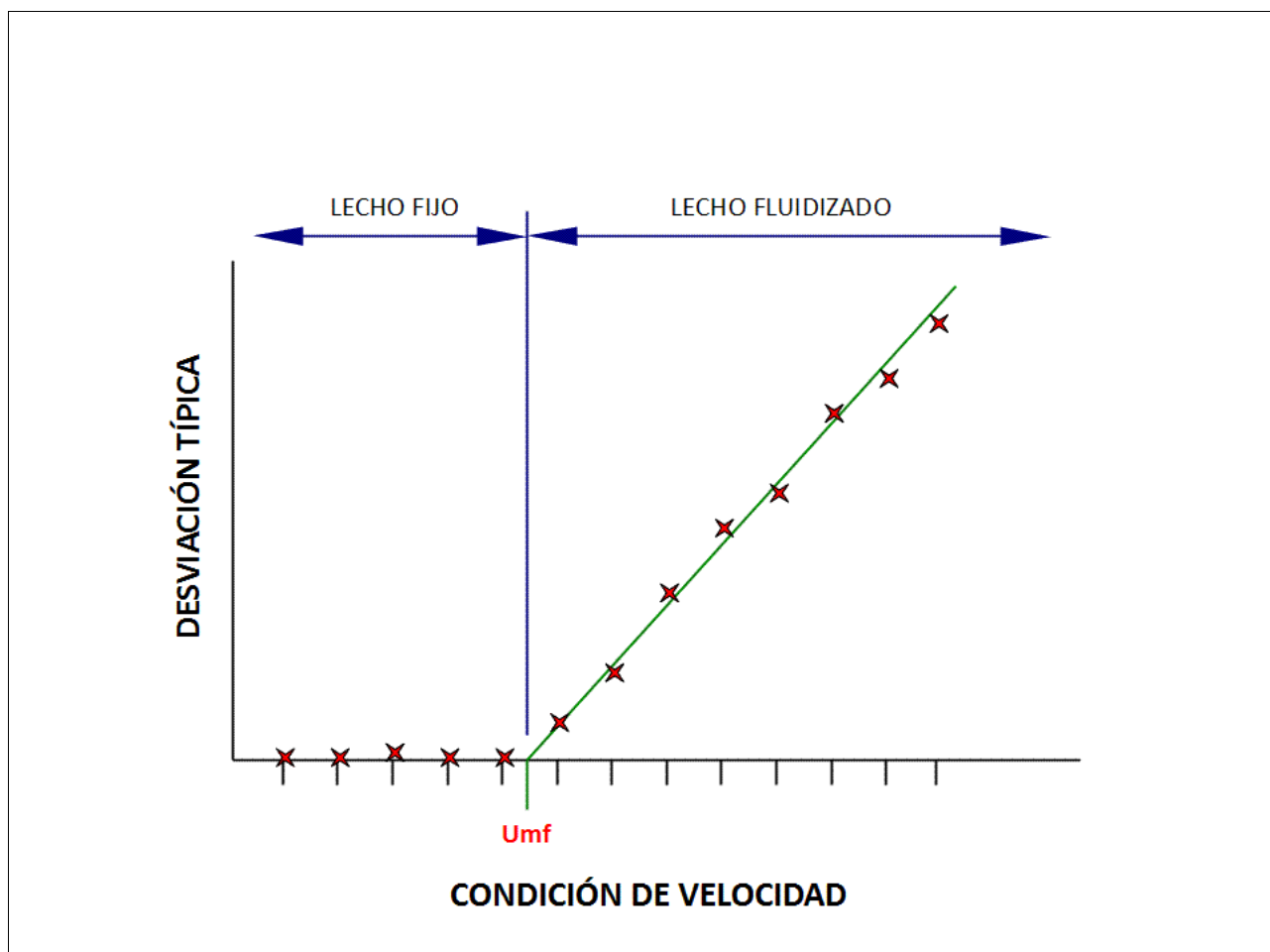


Figura 2.1.1.- Cálculo de la velocidad mínima de fluidización.-

Esta forma de calcular la velocidad mínima de fluidización también es aplicable a señales obtenidas a partir de acelerómetros. A lo largo de este trabajo se comprobará que el cálculo se puede realizar con ambos tipos de sensores y que el resultado es el mismo. Si el resultado utilizando acelerómetros fuera diferente, la utilización de este tipo de sensores no sería válida, ya que el cálculo de la velocidad mínima de fluidización es un paso fundamental a la hora de monitorizar un lecho fluidizado.

2.2- TIPOS DE FLUIDIZACIÓN:

La fluidización es un fenómeno que puede manifestarse de diferentes formas. De acuerdo a las características del lecho y de las condiciones de operación, pueden producirse diferentes tipos de fluidización. En este apartado se exponen brevemente los estados de fluidización en los que se puede encontrar el lecho de un reactor químico (Kunii, 1991, p.2).

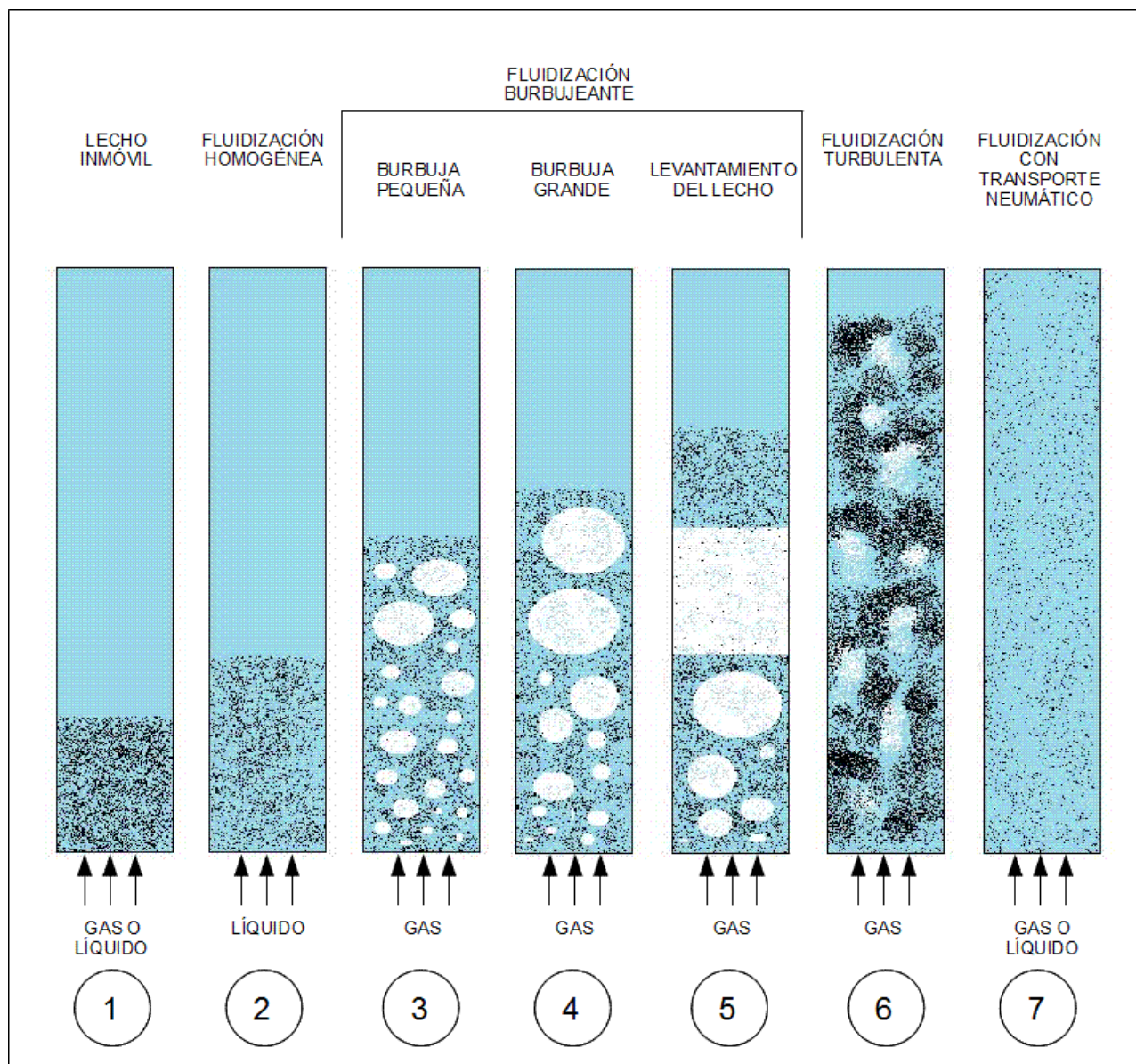


Figura 2.2.1.- Tipos de fluidización.-

A continuación se define, de forma breve, cada uno de los tipos de fluidización:

1.- Lecho fijo:

Esta condición se da cuando la velocidad del fluido no es suficientemente alta para levantar las partículas sólidas. En esta condición no existe fluidización.

2.- Fluidización homogénea o incipiente:

En este caso, la velocidad del fluido provoca la vibración de las partículas y un ligero movimiento, pero no es suficiente para generar burbujas. La aparición de este movimiento es lo que determina la condición de mínima fluidización. A partir de este punto, según aumenta el caudal, se produce un aumento en el volumen del lecho y aparecen los diferentes tipos de fluidización, que se describen a continuación.

3.- Fluidización burbujeante con burbuja pequeña:

Cuando el caudal de aire supera un cierto límite, aparecen en el lecho burbujas. En este punto, la fluidización pasa de ser homogénea a ser burbujeante.

4.- Fluidización burbujeante con burbuja grande:

El aumento del caudal provoca que las burbujas que aparecen en el lecho sean cada vez más grandes. El tamaño de las burbujas puede aumentar hasta el punto de que ocupen la mayor parte de la sección del reactor.

5.- Fluidización burbujeante con levantamiento del lecho:

En algunos casos, dependiendo del grosor del lecho y de las características de las partículas, puede darse el fenómeno de levantamiento del lecho. Se produce cuando aparecen burbujas tan grandes que ocupan toda la sección del lecho. En este caso, el fluido levanta parte del lecho durante un corto periodo de tiempo.

6.- Fluidización turbulenta:

La condición de fluidización turbulenta aparece con caudales superiores al de burbujeo. El movimiento de las burbujas es muy rápido y provoca que las partículas salgan proyectadas hacia arriba generando choques entre las partículas que suben y las que bajan.

7.- Fluidización con transporte neumático:

Cuando la velocidad del fluido es muy alta puede producirse el transporte de las partículas fuera del lecho. Por lo general, no se pretende alcanzar esta condición.

2.3- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS LECHOS FLUIDIZADOS:

Los lechos fluidizados se caracterizan fundamentalmente por presentar un comportamiento muy similar al de un fluido. A continuación se enumeran algunas de estas características (Kunii, 1991):

- ✧ En el interior de un lecho fluidizado, las partículas de mayor densidad tienden a desplazarse hacia abajo y las de menor densidad tienden a situarse arriba. Si existe burbujeo, las burbujas ayudan a que se produzca este desplazamiento con mayor velocidad.
- ✧ El movimiento de las partículas en el interior del lecho ayuda a la homogeneización de las diferentes sustancias que componen las partículas del lecho, así como a la distribución de la energía (calor). Los procesos físicos o químicos entre las partículas sólidas y el fluido también resultan muy homogéneos.
- ✧ Si se introduce en el interior del lecho un objeto con menor densidad que el lecho, se verá desplazado hasta la superficie del lecho, es decir, “flotará”.
- ✧ Aunque el reactor químico que contiene el lecho esté inclinado, la superficie del lecho tendrá tendencia a situarse en posición horizontal, de la misma forma que lo hace un fluido.
- ✧ La diferencia de presión entre dos puntos de un lecho situados a diferente altura, está relacionada con la masa de las partículas contenidas entre los dos puntos.
- ✧ La fluidización de un lecho puede producir el flujo de las partículas entre diferentes zonas del lecho. Este flujo, aunque limitado por el tamaño de las partículas, sigue las mismas reglas que los flujos de líquidos o gases. Por ejemplo, dos lechos de diferentes alturas unidos por un conducto generarán un flujo de partículas a través del conducto desde el lecho más alto al más bajo hasta que se igualen las alturas (“Teoría de los Vasos Comunicantes”).
- ✧ La movilidad de las partículas en el interior del lecho puede regularse a través del caudal del fluido que genera la fluidización. La movilidad tiene un rango muy amplio, pudiendo ser nula (fluidización homogénea) o muy alta (fluidización con transporte neumático).

Todas estas características permiten la utilización de los lechos fluidizados en multitud de procesos industriales. En el siguiente apartado se verán las diferentes aplicaciones de los lechos fluidizados.

2.4- APLICACIONES DE LOS LECHOS FLUIDIZADOS:

La posible utilización de un reactor químico con lecho fluidizado aparece en el momento en el que se quiere poner en contacto una sustancia sólida con otra líquida o gaseosa. El objetivo que se pretende es que se produzca, entre ambas sustancias, una o varias reacciones, que pueden ser químicas o físicas. A continuación se enumeran las principales aplicaciones que tienen los lechos fluidizados en la industria (Kunii, 1991):

1. PROCESOS FÍSICOS:

- ⤴ Intercambio de calor.
- ⤴ Solidificación de sólidos fundidos para fabricación de gránulos.
- ⤴ Revestimiento plástico de objetos metálicos.
- ⤴ Secado de sólidos.
- ⤴ Revestimiento de objetos y crecimiento de partículas.
- ⤴ Adsorción.

2. REACCIÓN DE SÍNTESIS:

- ⤴ Anhídrido ftálico.
- ⤴ Proceso de síntesis *Fischer-Tropsch*.
- ⤴ Obtención de acrilonitrilo mediante *Proceso Sohio*.
- ⤴ Anhídrido maleico.
- ⤴ Otras reacciones catalíticas.
- ⤴ Polimerización de olefinas.

3. CRAQUEO O *CRACKING* DE HIDROCARBUROS:

- ⤴ Craqueo catalítico fluido.
- ⤴ Coquización fluida y proceso “Flexi-Coking”.
- ⤴ Craqueo térmico.

4. COMBUSTIÓN E INCINERACIÓN:

- ⤴ Combustión fluidizada de carbón.
- ⤴ Incineración de residuos sólidos.

5. CARBONIZACIÓN Y GASIFICACIÓN:

- ⤴ Gasificación de carbón y coque.
- ⤴ Activación de carbón.
- ⤴ Gasificación de residuos sólidos.

6. CALCINACIÓN.

7. REACCIONES ENTRE SÓLIDOS:

- ⤴ Horneado de minerales de sulfuro.
- ⤴ Silicio para las industrias de semiconductores y células solares.
- ⤴ Cloración y fluoración de óxidos metálicos.
- ⤴ Reducción de óxido de hierro.

8. BIOFLUIDIZACIÓN.

3.- DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO:

3.1- DESCRIPCIÓN DEL REACTOR:

El reactor químico es el elemento central de proyecto, porque sobre él se realizan todas las medidas de presión y vibración. Su forma es cilíndrica, con 70 mm de diámetro interior y una longitud de 1200 mm. La parte inferior o plenum está fabricada en aluminio. La parte superior está fabricada con un material transparente, poli-metil-metacrilato (PMM), para poder observar el comportamiento del lecho. Está sujeto a la pared del laboratorio mediante dos soportes. La posición de estos soportes puede ser modificada, y será uno de las variaciones a realizar durante el desarrollo de los ensayos.

En el siguiente esquema se expone la morfología del reactor y la distribución de sus elementos:

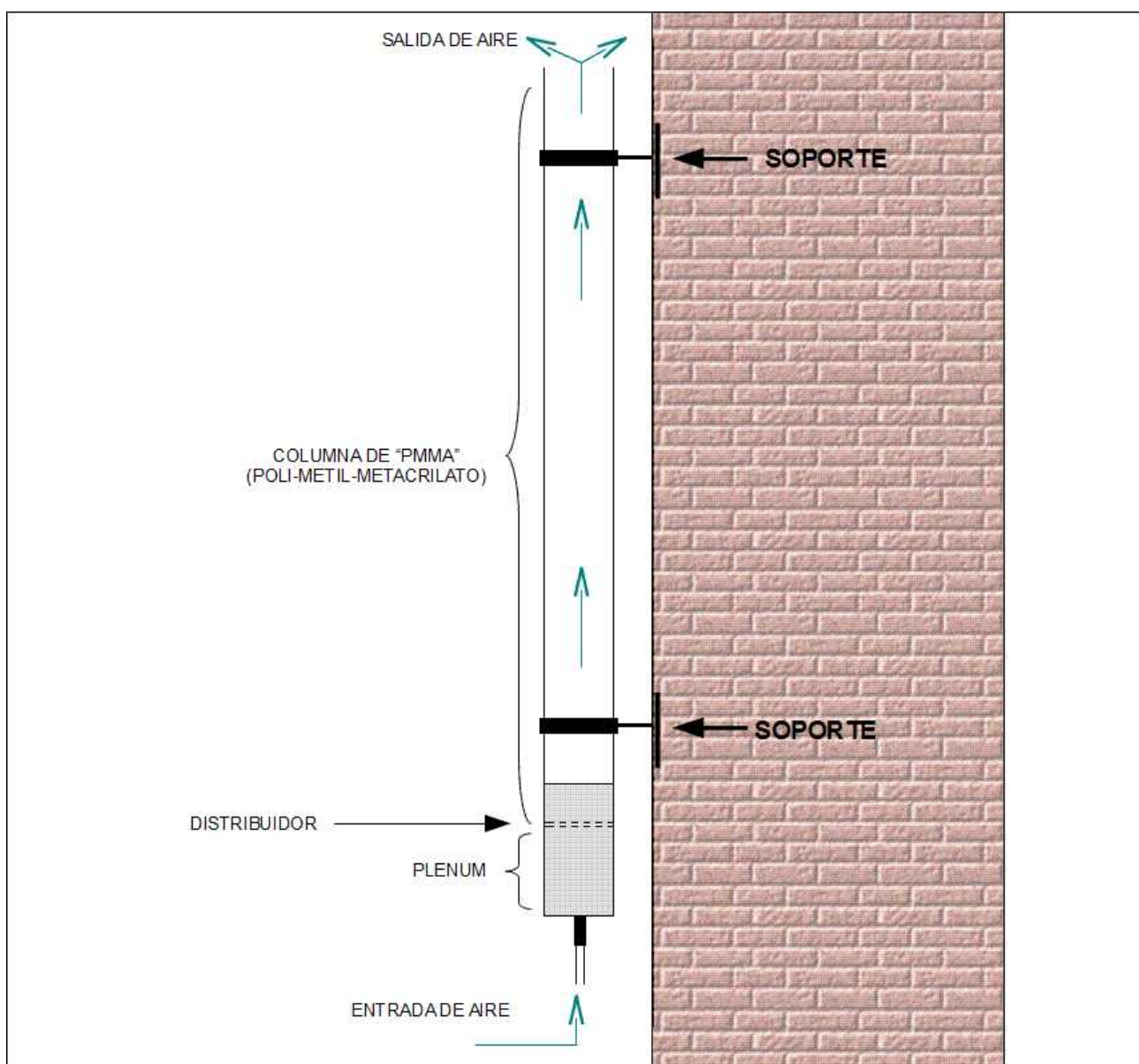


Figura 3.1.1.- Esquema del reactor.-

En el reactor podemos diferenciar varias zonas:

- ✦ **Plénium.** Se trata de una cámara, situada en la parte inferior del reactor, que recibe el fluido de la instalación de aire a presión por una tubería situada en la parte inferior. Su función es la de tratar de que al distribuidor le llegue el caudal de la forma más homogénea posible, para lo cual, dispone de un elemento homogenizador (esponja metálica). Tiene un orificio a cada lado: uno para la medida de presión y otro para introducir los cables de los sensores de vibración que se situarán en el distribuidor.
- ✦ **Distribuidor.** Es una pieza en forma de disco que está situada entre el plénium y el lecho, y su misión es distribuir el caudal de aire de la forma más uniforme posible. Fabricada en aluminio, está compuesta por un disco sobre el que se disponen, de forma uniforme, siete tuyeres. Cada uno de estos tuyeres tiene ocho orificios de 0,5mm de diámetro. En su zona inferior se situarán uno o dos acelerómetros, que medirán su vibración en dirección vertical. En la siguiente figura se muestra un esquema de las piezas fabricadas en aluminio, que componen el plénium, el distribuidor y parte del lecho:

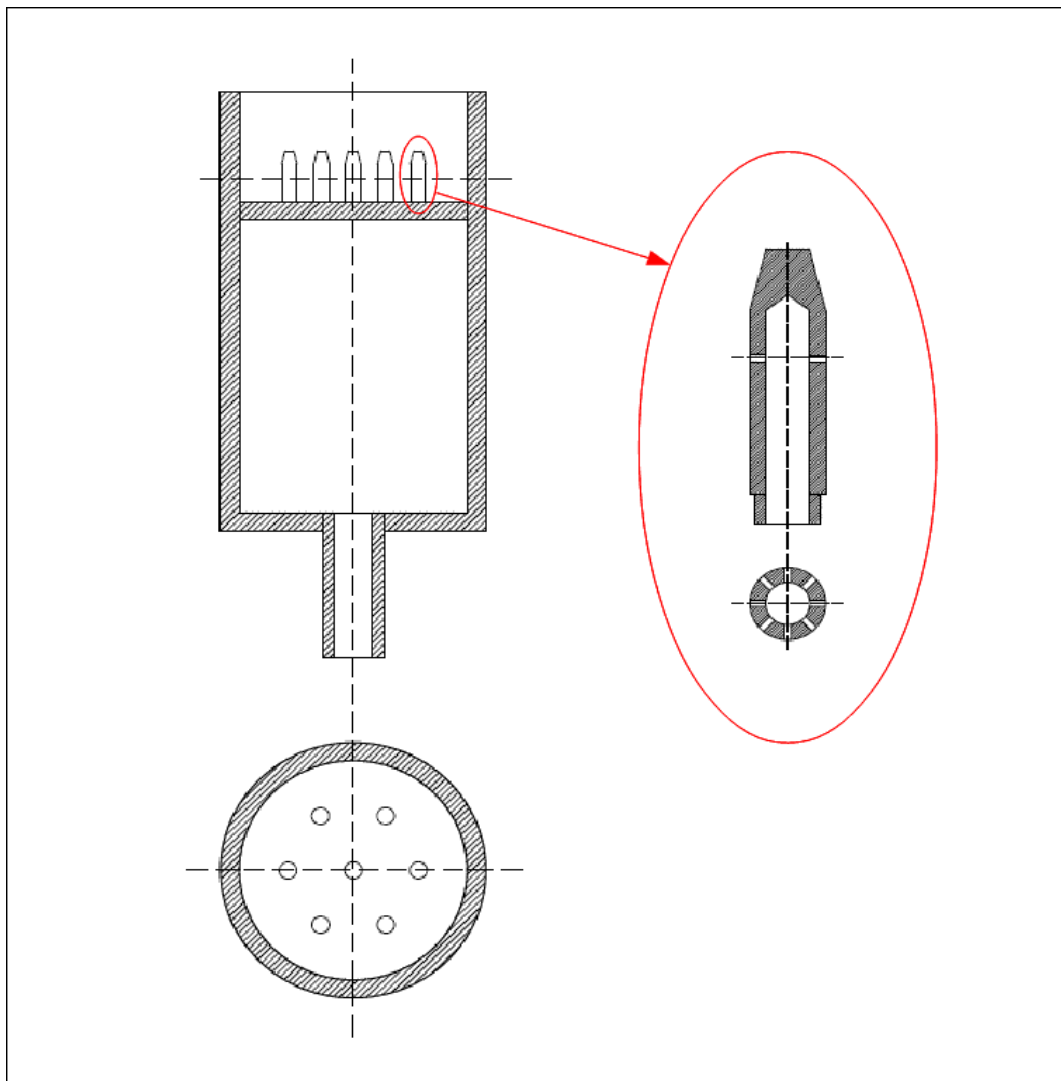


Figura 3.1.2.- Plano: Plénium-distribuidor-lecho y detalle de los tuyeres.-

En la siguiente fotografía se muestra la parte inferior del distribuidor. En ella se pueden ver los siete orificios en los que van alojados los tuyeros. Los orificios de la zona externa sirven para fijar la pieza al plenum, mediante tornillos. Como se puede ver en la fotografía, en la superficie inferior del distribuidor se han instalado dos soportes para la colocación de los acelerómetros. Estos acelerómetros medirán la vibración existente en el distribuidor, en dirección vertical.



Figura 3.1.3.- Zona inferior del distribuidor.-

- ✧ **Columna de PMMA.** Se trata de un cilindro, de 70mm de diámetro y 1000mm de longitud, de poli-metil-metacrilato. La columna y el distribuidor delimitan la cavidad del reactor en la que se encuentran las partículas sólidas a fluidizar: “el lecho”, que comienza en el distribuidor y se extiende hasta el final de las partículas. La altura del lecho variará en función de la cantidad de partículas que se introduzcan en la columna, y será una de las variables a tener en cuenta durante los ensayos. La columna de PMMA se une, mediante una brida metálica, a la parte superior de la pieza de aluminio (plenum + distribuidor). En esta zona del lecho, en adelante “parte metálica del lecho”, al igual que en el plenum, existe un orificio para la colocación de un sensor de presión. A lo largo de la columna de PMMA se colocarán uno o varios sensores de vibración. Su distribución se determinará a lo largo del proyecto.

Las partículas sólidas que componen el lecho de un reactor químico pueden ser de materiales y tamaños muy diversos. Los ensayos mostrados en este trabajo se han realizado con esferas de vidrio llamadas “Ballotini”. Las esferas tienen entre 1 y 1,3mm. de diámetro, y la densidad del material es de 2500Kg/m^3 . El tipo de partículas que componen el lecho es muy importante en el comportamiento de éste. Existen estudios que asocian ambos aspectos, como el realizado por H.

Kage (2000).

El fluido utilizado para generar la fluidización del lecho es aire. La entrada de aire al lecho se realiza a través del orificio situado en la parte inferior del plenum. El aporte de aire se realiza mediante la instalación de aire a presión existente en los laboratorios de la Universidad. La línea de presión que alimenta el sistema se ajusta a 2bares, presión suficiente para generar los 500l/min de caudal máximo que se utilizarán durante las pruebas.

El caudal de aire que circula a través del lecho es un parámetro de vital importancia en el desarrollo de los ensayos. Además, el caudal será una variable del proceso: se realizarán pruebas con diferentes caudales. Por estas razones es importante poder regular correctamente el caudal de aire introducido en el el lecho. Para ello se dispone de un **Rotámetro o Caudalímetro**, con el que se puede variar y ajustar el caudal de entrada. Adicionalmente, se dispone de un **Flujostato Electrónico** conectado al circuito neumático, con el que se obtiene una medida más precisa del caudal. Dicho flujostato es de la marca **SMC**, modelo **PF2A751**.

3.2- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDIDA:

En este apartado se expone el material que se ha utilizado en la ejecución del proyecto. Todo el material utilizado está pertenece a la Universidad Carlos III y está destinado a investigación. El elemento principal del material utilizado es el reactor químico (ya definido en el punto anterior), sobre el que se harán todas las medidas. Alrededor de él se instalarán la instrumentación destinada a monitorizar el reactor, tanto en presión como en vibración. En la fotografía de la figura 3.2.1 se muestra el material utilizado:

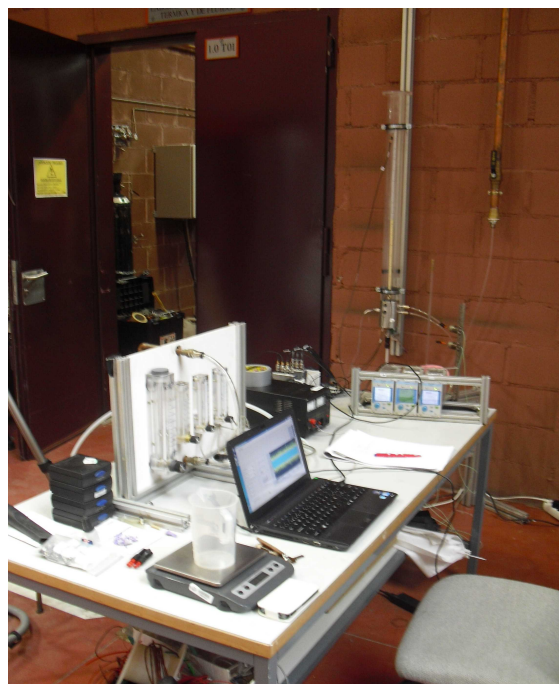


Figura 3.2.1.- Material utilizado.-

El sistema de monitorización que se ha instalado en el reactor puede dividirse en tres partes:

- ⤴ Cadenas de medida de presión (para medida de presión en dos puntos).
- ⤴ Cadenas de medida de vibración (para medida de vibración en cuatro puntos).
- ⤴ Sistema de adquisición y tratamiento de señales (para el análisis de todas las señales, tanto de presión como de vibración).

En la siguiente figura se muestra un esquema general de la instrumentación utilizada para la monitorización del reactor:

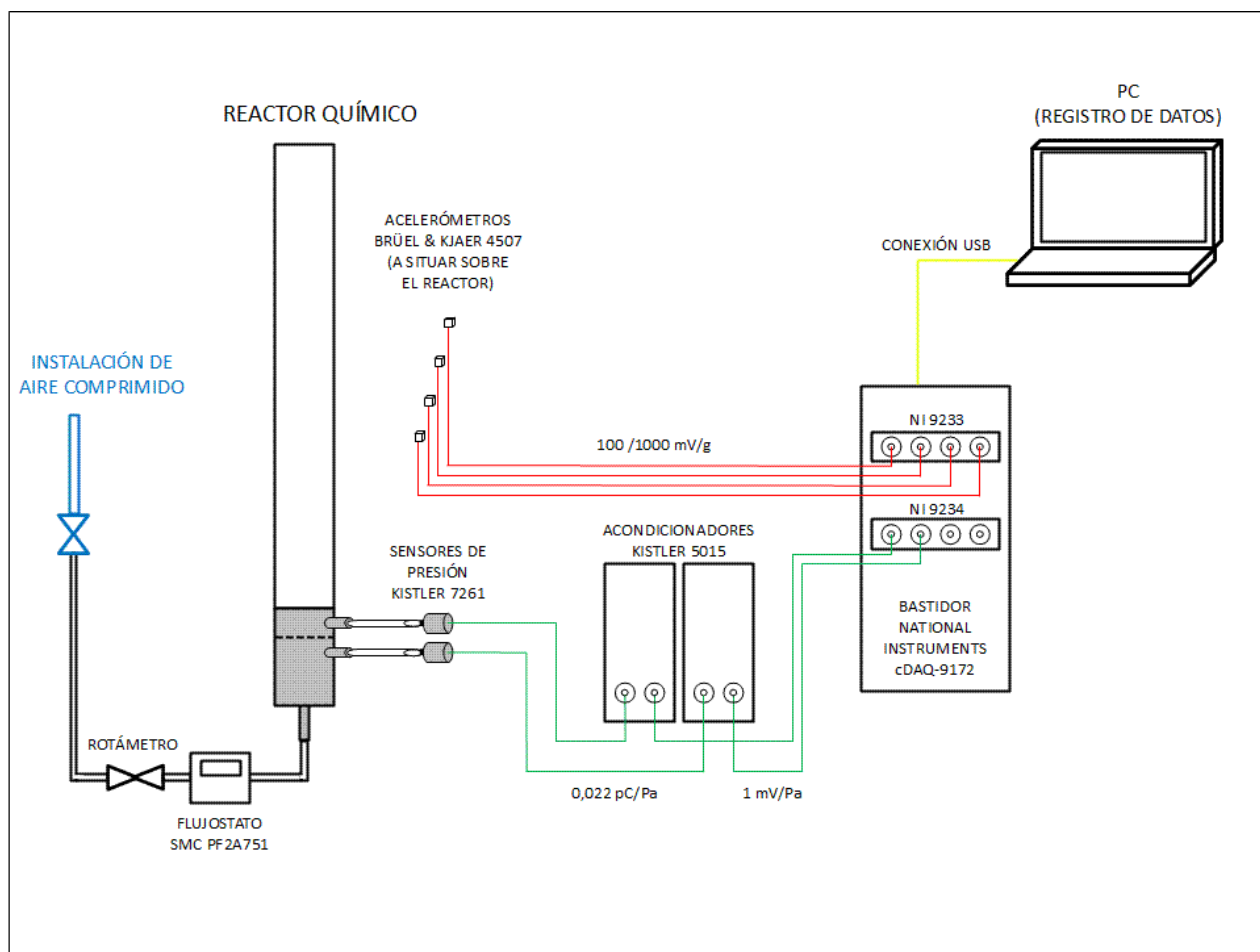


Figura 3.2.2.- Esquema general de la instrumentación utilizada.-

A continuación se detallan las características de los sistemas de medida:

Cadena de medida de presión:

Se dispone de dos cadenas de medida de presión. Los sensores leen la presión existente en dos orificios existentes en el reactor. Uno de ellos está en el plenum y el otro en la parte metálica del lecho (1cm por encima del distribuidor). La posición de estos orificios no cambiará durante las pruebas, porque para ello sería necesario modificar la morfología del reactor. Cada una de las cadenas de medida está compuesta por los siguientes elementos:

- ⤴ **Sensores:** Sensores de presión marca **Kistler**, modelo **7261**. Estos sensores proporcionan una señal en carga de 2200pC/bar (0,022pC/Pa). La señal de salida se transmite, mediante un cable coaxial de bajo ruido hasta los acondicionadores de señal.
- ⤴ **Acondicionadores (Charge Meters):** Los sensores de presión proporcionan una señal en carga. El sistema de adquisición utilizado solo admite señales en voltaje. Por ello, es necesario acondicionar la señal. Se hace mediante un acondicionador de carga, marca **Kistler**, modelo **5015**. La salida es configurable y se ajustará para que proporcione una señal de 1mV/Pa.

- ⤴ **Tarjeta de adquisición de señal:** La señal de salida de los acondicionadores se conecta a la tarjeta de adquisición marca **National Instruments**, modelo **9234**, de cuatro canales de medida.

Cadena de medida de vibración:

Se dispone de cuatro cadenas de medida. Los sensores utilizados son acelerómetros uniaxiales (miden la aceleración en una única dirección), por lo que es importante tener en cuenta la dirección de medida de cada uno de ellos. Los sensores se colocarán a lo largo del reactor y su situación está sujeta a modificaciones. Las cuatro cadenas de medida se componen de los siguientes elementos:

- ⤴ **Sensores:** Acelerómetros marca **Brüel&Kjaer**, modelo **4507**. Este tipo de acelerómetro dispone de electrónica integrada, que proporciona una señal en voltaje. De los cuatro sensores disponibles, tres de ellos tienen una sensibilidad nominal de 1000mV/g. El cuarto sensor tiene una sensibilidad de 100mV/g, y un rango de medida mayor. Este sensor permitirá comparar sensores de diferentes sensibilidades para determinar cuál es el más conveniente. Cada sensor se conecta directamente a la tarjeta de adquisición, mediante cable coaxial.
- ⤴ **Tarjeta de adquisición de señal:** La señal de salida de los sensores se conecta a la tarjeta de adquisición marca **National Instruments**, modelo **9233**, de cuatro canales de medida. Aunque la señal de salida de los sensores es en voltaje y no necesita ser acondicionada, la tarjeta debe alimentar la electrónica del sensor. Esto lo hace mediante una corriente de polarización de 4mA, que se transmite a través del mismo cable de comunicación.

En la siguiente tabla se enumeran los sensores de vibración utilizados indicándose la sensibilidad exacta de cada uno de ellos:

Acelerómetro nº	Modelo del acelerómetro	Número de serie	Sensibilidad [mV/g]
1	4507 B 005	10336	995
2	4507 B 005	30092	1057
3	4507 B 005	30093	1032
4	4507	32036	97,34

Tabla 3.2.1.- Acelerómetros utilizados.-

Sistema de adquisición y tratamiento de señales:

Se compone de los siguientes elementos:

- ⤴ **Sistema de adquisición:** El sistema de adquisición se compone de las dos tarjetas mencionada anteriormente, marca **National Instruments**, modelos **9234 y 9233**. Ambas tarjetas se conectan a un bastidor de la misma marca, modelo cDAQ-9172. El bastidor se encarga de alimentar las tarjetas y transmitir una salida con las señales de los seis canales de medida, multiplexadas, La salida se transmite a través de un cable USB hasta el ordenador portátil.
- ⤴ **Ordenador portátil:** Dispone de una aplicación, programada en “Labview” por la Universidad, para la adquisición de señales provenientes de las tarjetas utilizados en este proyecto. La aplicación genera ficheros en formato universal para su posterior análisis. El ordenador también dispone del programa “Matlab”, que se utilizará para el posterior tratamiento y análisis de las señales.

3.3- DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS:

Una vez realizado el montaje del reactor (definido en el punto 3.1) y el montaje del sistema de monitorización (definido en el punto 3.2), se está en disposición de comenzar a ejecutar las medidas. En este punto se define la manera de ejecutarlas.

Antes de iniciarse las medidas de presión y vibración, se realizó un ensayo preliminar para determinar los caudales a utilizar. En dicho ensayo, se inyectó el caudal necesario para que el lecho adquiriera su estado de máxima fluidización (limitado por la altura del lecho). Para llegar a este estado fue necesario introducir un caudal de 500 l/min aproximadamente. A raíz de esta prueba se determinó que las medidas se realizarían con caudales de 50 a 500 l/min, en escalones de 50 l/min. Por tanto, se determinan diez condiciones de caudal, con las que se espera obtener todas las condiciones de fluidización presentes en este lecho. Durante el proyecto, se realizarán medidas en diferentes configuraciones. En todas ellas se adquirirán datos en las diez condiciones de caudal definidas.

Para determinar la disposición más idónea de los sensores de acelerometría, se realizará una sucesión de ensayos a un caudal tal que haya una buena fluidización. Este caudal se fijó, de forma visual, en 250 l/min.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los ensayos realizados.

Objetivo	Altura del lecho (mm)	Caudal de aire (l/min)	Tiempo de adquisición (min)	Comentarios
Definición del sistema de adquisición para acelerómetros	70	250	4	Se repitió 3 veces (detallado en el apartado 5)
Caracterización dinámica del lecho	70 y 160	0-500	4	Mediciones cada 50 l/min

Tabla 3.3.1.- Ensayos realizados.-

Todas las cadenas de medida, tanto de presión como de vibración, transmiten las señales a las tarjetas de adquisición 9233 y 9234 de National Instruments. Las tarjetas digitalizan las señales y las transmiten al ordenador, que las almacena para su posterior procesamiento. De acuerdo a esta manera de analizar los resultados, el proceso denominado como “medida”, puede dividirse en dos fases: Adquisición y procesamiento.

1. Adquisición:

El programa de LabView, a través del cual se controlan las tarjetas de adquisición, permite configurar la frecuencia de adquisición. Basándose en pruebas anteriores realizadas sobre este reactor, se decide programar una frecuencia de muestreo de 10kHz. Pruebas realizadas anteriormente al inicio de este proyecto, demuestran que no existe diferencia alguna entre muestrear a 10kHz y hacerlo a 12kHz.

Los acondicionadores de señal (Charge Meters) tienen la posibilidad de filtrar su señal de salida. En todas las medidas realizadas en este proyecto se han aplicado filtros de acuerdo a las frecuencias de interés (Van Ommen, 2010): Filtro paso-alto de 0,16 y filtro paso-bajo de 20Hz. Hay que tener en cuenta que este filtrado se realiza antes que el registro de la señal. Las componentes que han sido filtradas no llegan a ser adquiridas, por lo que no van a poder ser recuperadas durante el postprocesado.

El resultado de LabView son ficheros en formato universal, compuestos por columnas de datos correspondientes a cada uno de los canales de medida. Estos ficheros serán procesados mediante un programa de Matlab.

2. Procesado:

El procesado de los datos obtenidos durante la adquisición se realiza mediante un programa definido a través de Matlab. A través de dicho programa es posible realizar múltiples tratamientos a las señales adquiridas. En este proyecto se utilizarán algunos de estos tratamientos, como son: remuestreo, filtros, desviación típica, Transformada de Hilbert y PSD. El procesado que se realice a las medidas se define en el apartado 5 “Determinación de la disposición de los sensores de medida”.

4.- TRATAMIENTOS DE LAS SEÑALES:

4.1- TEOREMA DE NYQUIST:

El sistema de adquisición de señales, descrito en el apartado 2, realiza una digitalización de las señales que recibe, de acuerdo a la configuración que se realiza a través de la aplicación Programada en LabView. La frecuencia de muestreo es programable en cada adquisición y para cada canal de medida.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta al definir la configuración de la adquisición, es el Teorema de Nyquist. Este teorema establece la mínima frecuencia de muestreo que debe tener una adquisición para asegurar la reproducción digital de dicha señal, sin pérdida de información. Según el Teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser, al menos, el doble de la frecuencia más alta contenida en la señal a muestrear.

Si en el proceso de adquisición no se tiene en cuenta este teorema, no se puede asegurar la adquisición de todas las frecuencias contenidas en la señal. Además, se corre el riesgo de que se produzca un fenómeno, conocido con el nombre de “aliasing”, que puede distorsionar la adquisición, dando como resultado la aparición de frecuencias inexistentes.

En el caso de las medidas de presión, como se ha explicado en el apartado 3.3.”Descripción de los ensayos”, los acondicionadores Kistler realizan un filtrado paso-bajo de la señal, de tal forma que la componente más alta que transmiten es de 200Hz. De acuerdo al Teorema de Nyquist, el muestreo a realizar será de 400Hz. El muestreo que realizará la tarjeta de National Instrumnts es de 10kHz, debido a las características técnicas de estas tarjetas, pero posteriormente, se realiza un remuestreo a 400Hz, mediante Matlab.

En el caso de las cadenas de medida de aceleración, no se realiza ningún filtrado de la señal durante la adquisición de la misma. La señal que proviene del sensor, se digitaliza sin ser filtrada porque se pretende detectar fenómenos de alta frecuencia, que se analizarán aplicando la transformada de Hilbert (que se verá más adelante). El sensor tiene una respuesta en frecuencia de hasta 6kHz. Las frecuencias de interés de estas pruebas se extienden hasta los 2kHz. Por ello, la frecuencia de muestreo de 10kHz de las tarjetas de National Instruments resulta conveniente.

4.2- FILTROS PASO-BAJO / PASO-ALTO:

En los procesos de adquisición y tratamiento de señales es muy habitual la utilización de filtros. En este trabajo se aplican, tanto filtros “paso-bajo” como “paso-alto”. Por ello, en este capítulo se hace una breve introducción sobre su aplicación.

El filtro paso-bajo es un dispositivo que atenúa las componentes frecuenciales que se encuentran por encima de la frecuencia de corte del filtro. El filtro paso-alto atenúa las componentes que se encuentran por debajo de la frecuencia de corte. La combinación de ambos filtros da como resultado el filtro paso-banda

Existen múltiples tipos de filtros, que consiguen atenuar la señal de diferentes formas. El filtro que se ha utilizado en este proyecto es el **Filtro Chebyshev tipo I**. Este tipo de filtro tiene un buen comportamiento en cuanto a la atenuación de las frecuencias que están fuera de la banda de paso, debido a que la transición se hace de una manera abrupta. Como inconveniente, presenta un rizado en la banda de paso, que se acentúa al aproximarse a la frecuencia de corte. El número de orden del filtro (n) determina la caída en la banda no pasante y el rizado en la banda pasante. Como ejemplo, en la siguiente figura puede verse como es la función de transferencia ($H(j\omega)$) de un filtro paso-bajo Chebyshev tipo I y cómo varía ésta de acuerdo al número de orden:

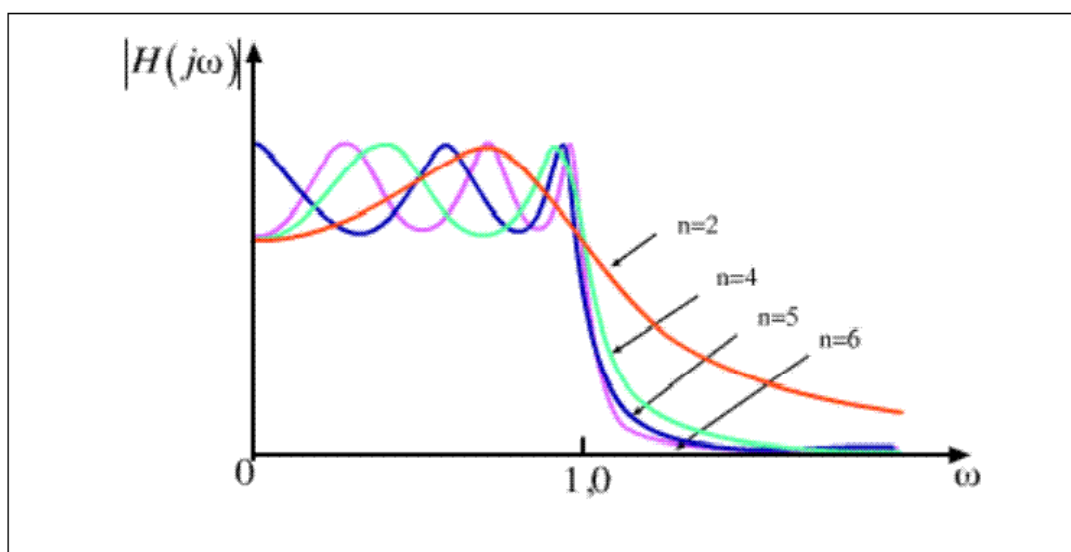


Figura 4.2.1.- Función de transferencia de un filtro paso-bajo Chebyshev tipo I.-

Existen dos maneras de filtrar una señal: El filtro analógico, que se realiza sobre una señal analógica, y el filtro digital, que solo puede aplicarse a señales digitales. En nuestro sistema de monitorización solo se utilizará el filtro digital.

En las cadenas de medida de presión de nuestro sistema de monitorización existen dos posibilidades a la hora de filtrar la señal: Puede hacerse a través del acondicionador Kistler 5015, o bien puede realizarse durante el postprocesado de la señal con Matlab. El acondicionador Kistler transmite la señal analógicamente, pero el filtrado lo realiza de forma digital, mediante un Procesador de

Señales Digitales (DSP), especial para este tipo de funciones. El filtrado de las señales de presión se realizará siempre con el acondicionador Kistler.

Las cadenas de medida de vibración carecen de acondicionador que pueda filtrar la señal, por lo que cualquier filtrado se realizará durante el postprocesado mediante Matlab. Hacer el filtrado de esta manera, permitirá modificar, con posterioridad a la adquisición, los parámetros del filtrado (frecuencias de corte y número de polos).

Para realizar la configuración se recurrió a los datos aportados por estudios previos (De Martín, 2010). Estos valores se comprobaron, durante las pruebas realizadas en este proyecto y, en algunos casos, se modificaron. La configuración que se utilizó para las pruebas definitivas fue: Filtro paso-bajo: Orden 6 a 40Hz. Filtro paso-alto: Orden 2 a 0,16Hz.

4.3- DESVIACIÓN TÍPICA DE UNA SEÑAL:

Se realizarán una serie de medidas de presión y vibración que quedarán registradas para su posterior análisis. Durante el análisis de estas señales en el dominio del tiempo, será necesario cuantificar la variación de presión y vibración que se produce durante toda la adquisición, en cada condición de medida. Es decir, se necesitará establecer un valor numérico que permita cuantificar la variación de presión y vibración. Ello se hará mediante la “desviación típica”.

La “**desviación típica**”, o “**desviación estándar**”, (σ) es una medida de dispersión que indica cuanto tienden a alejarse los valores concretos del promedio de una distribución. El cuadrado de la desviación típica es el promedio del cuadrado de la distancia de cada punto respecto de la media aritmética.

El valor de la desviación típica viene definido por la fórmula:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde:

σ = desviación típica.

x = valor de la muestra.

n = número total de muestras del registro.

El cálculo de la desviación típica será de utilidad a la hora de establecer el momento en el que comienza a existir fluidización (Johnsson, 2000). Es decir, permitirá calcular la “velocidad mínima de fluidización”. Dicho cálculo ya se explicó detalladamente en el apartado 2.1 (“Definición de fluidización”). También permitirá comprobar que la evolución que experimente la vibración del lecho es similar a la evolución de la variación de presión. Además, la desviación típica es uno de los parámetros que utiliza Matlab a la hora de calcular la “Power Spectral Density” (PSD), como se verá en los siguientes apartados.

4.4- TRANSFORMADA DE HILBERT – ENVOLVENTE DE UNA SEÑAL:

La transformada de Hilbert es una herramienta matemática que permite, entre otras cosas, obtener la envolvente de una señal. La envolvente es otra señal que sigue el contorno creado por las crestas de la señal original, tal como muestra la figura 4.4.1:

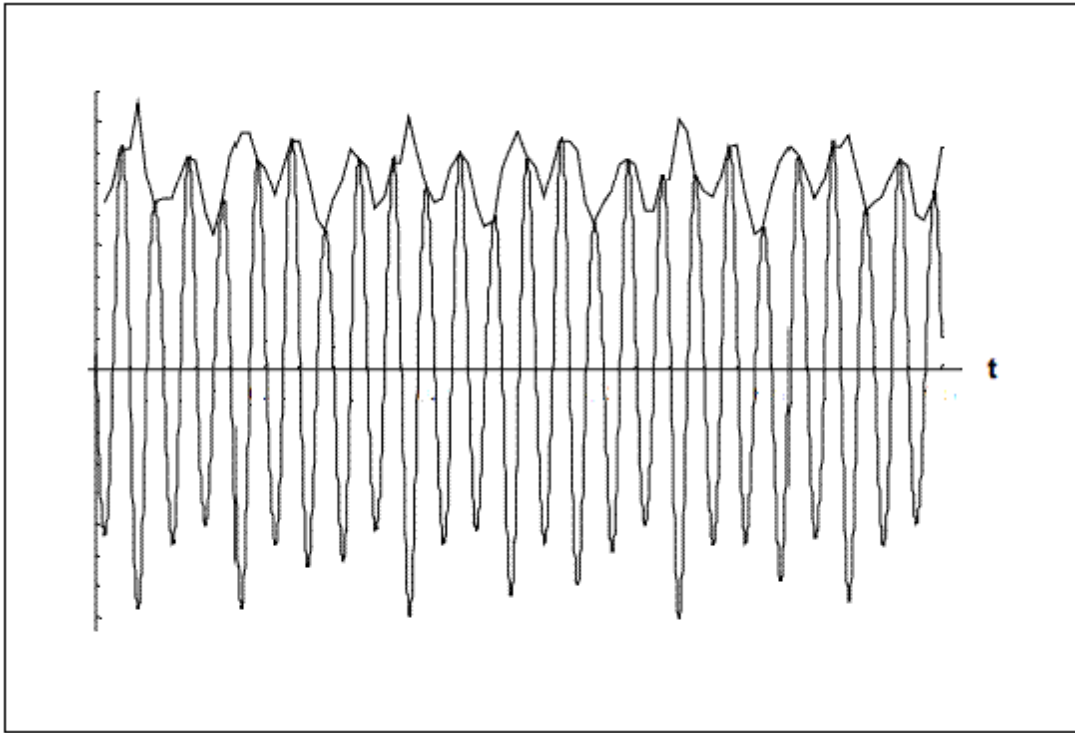


Figura 4.4.1.- Envolvente de una señal.-

El cálculo de la envolvente de una señal se realiza de la siguiente manera (Allen, 2003, p.689):

Dada una señal $s(t)$, la transformada de Hilbert de $s(t)$ se denota por $\hat{s}(t)$ y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \int \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

Se define ahora la señal, denotada por $s_a(t)$, como la suma entre la señal $s(t)$ y el producto de j por la transformada de Hilbert $\hat{s}(t)$, como expresa la siguiente ecuación:

$$s_a(t) = s(t) + j \cdot \hat{s}(t)$$

La envolvente puede obtenerse a partir del módulo de la señal $s_a(t)$:

$$\text{envolvente} = \text{Abs}[s_a(t)]$$

Justificación de la utilización de la envolvente:

El objetivo fundamental de este trabajo es relacionar las medidas obtenidas mediante sensores de presión con las medidas obtenidas mediante acelerómetros. Las variaciones de presión que se producen en el interior de los reactores están relacionadas con la frecuencia con la que se generan las burbujas. Dicha frecuencia es siempre baja, nunca superior a 10Hz. En las mediciones que se realicen con acelerómetros, se intentará encontrar las similitudes que pueda haber entre ambos tipos de señales. Según estudios realizados (De Martín, 2010), las medidas directas de vibración no son capaces de registrar componentes de estas frecuencias, por lo que, en principio, no serían válidas para este propósito.

Para llegar a relacionar los resultados de las medidas de presión y aceleración es necesario analizar lo que sucede en el interior del lecho: Cada vez que una burbuja de aire abandona el lecho, se produce una variación de presión brusca. Por esta razón, las frecuencias relevantes en los espectros de presión están relacionadas con el comportamiento dinámico de las burbujas y del propio lecho. En cambio, la señal en bruto de los sensores de vibración no es capaz de detectar el movimiento del lecho. Ahora bien, cuando una burbuja abandona el lecho, las partículas sólidas que estaban por encima de ella caen sobre el lecho, generando una vibración causada por el choque de las partículas sólidas. Estos choques, que se producen a unas frecuencias mucho más altas (mayores de 2kHz), sí generan un movimiento en el reactor, detectable por los acelerómetros. Si se calcula la envolvente de la señal de vibración producida por todos estos pequeños choques, debería obtenerse una frecuencia relacionada con la dinámica del lecho y, por tanto, la misma frecuencia que detectan los sensores de presión.

La figura 4.4.2 ilustra el resultado de este procedimiento de análisis:

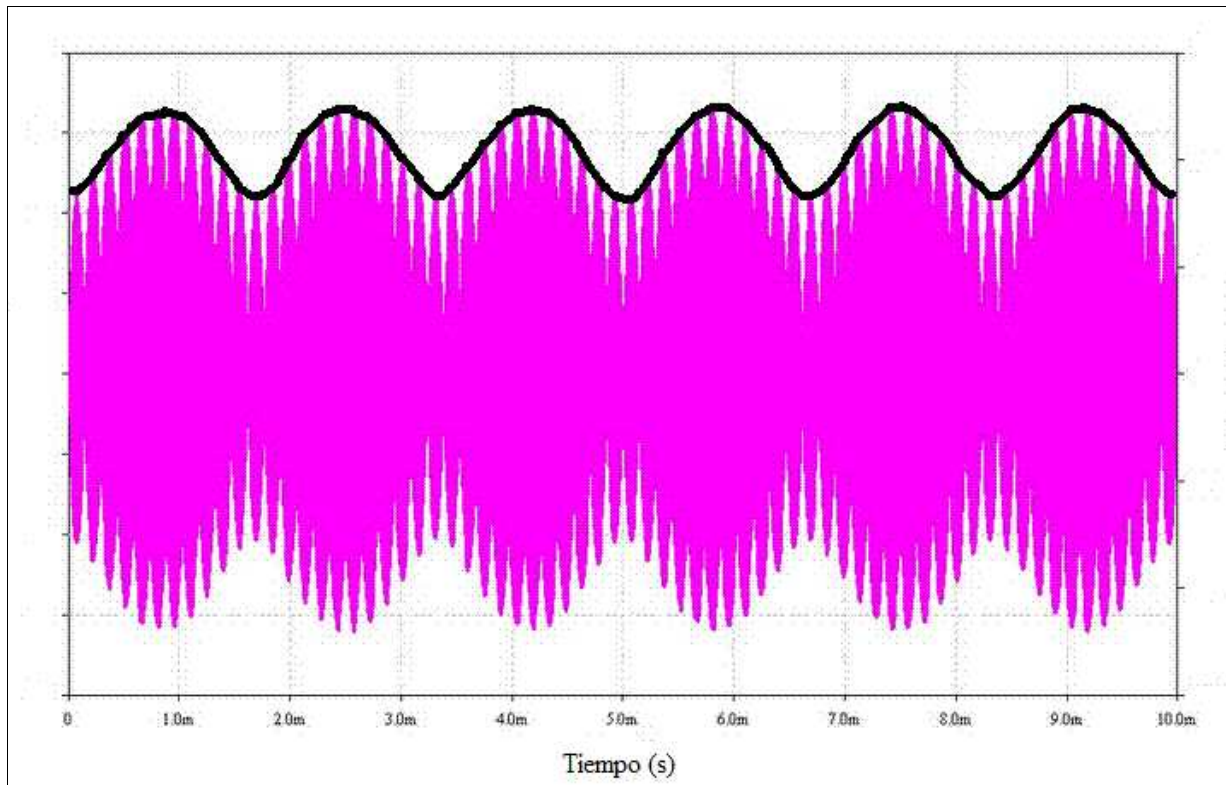


Figura 4.4.2.- Resultado de la Transformada de Hilbert.-

Estudios realizados anteriormente (De Martín, 2010), con un reactor muy similar al utilizado en este proyecto, ponen de manifiesto que: Es necesario analizar la envolvente de la señal adquirida con acelerómetros para poder relacionarla con la señal adquirida por sensores de presión. No obstante, durante este trabajo, se evaluará la conveniencia de analizar la señal envolvente o analizar la señal proporcionada directamente por el sensor, y se tratará de determinar qué procedimiento proporciona mejores resultados.

4.5- ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA – PSD:

El resultado de un análisis en el dominio de la frecuencia, que da como resultado el espectro, supone una herramienta de mucha utilidad a la hora de comparar diferentes señales. El procesamiento en el dominio de la frecuencia más utilizado en este tipo de estudios, es el **PSD (Power Spectral Density)** o **DEP (Densidad Espectral de Potencia)**.

La PSD describe la distribución de la potencia media de la señal en el espectro de frecuencias. Con la PSD es posible obtener el contenido de potencia promedio contenida en una banda de frecuencias finitas.

El teorema de **Wiener-Khinchin** define el cálculo de la PSD relacionándola con la transformada de Fourier de la función de autocorrelación de la señal a analizar. Es decir:

Dada una función $x(t)$, se calcula su función de autocorrelación: R_x .

La PSD, $S_x(f)$ viene definida por la siguiente ecuación:

$$S_x(f) = TF \{ R_x(\tau) \} = \int R_x(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau$$

En todos los análisis en el dominio de la frecuencia que se hagan durante el proyecto se utilizará la PSD, calculada de acuerdo al método definido por P.D. Welch (1967), utilizando una ventana Hamming, con un 50% de solapamiento (*overlapping*) entre estas. Se ejecutará durante la fase de postprocesado de la señal y se hará mediante Matlab.

5.- DETERMINACIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS SENSORES DE MEDIDA:

5.1- INTRODUCCIÓN:

El objetivo de las pruebas realizadas es encontrar señales de acelerometría equiparables a las de presión. Para ello, a medida que se ha ejecutado el proyecto se han hecho modificaciones en la posición de las bridas del reactor y en la disposición de los sensores, hasta alcanzar la disposición más favorable. Es criterio para establecer la disposición más favorable se describe en el siguiente apartado (5.2).

Las modificaciones realizadas sobre el reactor se limitan a la variación de la altura de los soportes. Aunque pudiera parecer un cambio insignificante, supone un cambio importante en la rigidez de todo el lecho, lo que puede generar una variación significativa en su respuesta vibratoria. En el esquema de la figura 3.1.1, del apartado 3.1 (“Descripción del reactor”), se muestran los elementos fundamentales del reactor y la colocación inicial de los soportes.

Los sensores de presión se han situado en los únicos lugares posibles, según la forma en la que está construido el reactor. Uno de ellos mide la presión existente en el plenum y el otro mide la presión en el lecho. En la figura 5.1.1, se representa un esquema de su situación.

De los cuatro sensores de vibración, inicialmente se han colocado dos en puntos que están a la misma altura que los sensores de presión, en la pared exterior del reactor. Para el resto de sensores de vibración se ha buscado un lugar en el que la respuesta vibratoria pueda ser significativa. El resultado se definirá a lo largo de este capítulo.

Todos los estudios previos realizados mediante acelerometría, muestran resultados obtenidos a partir de sensores colocados en dirección horizontal. Uno de los objetivos de este proyecto es estudiar la conveniencia de utilizar acelerómetros que midan en dirección vertical. En las pruebas realizadas en este proyecto, se ha considerado conveniente realizar medidas de vibración en dirección vertical en el interior del plenum, concretamente en la parte inferior del distribuidor. La zona utilizada para medir en dirección vertical está indicada en la figura 5.1.1. Una vez realizadas estas medidas, se compararán con las medidas obtenidas con sensores de presión y con sensores de vibración en dirección horizontal. Finalmente, se determinará la dirección de medida más adecuada para el propósito del proyecto.

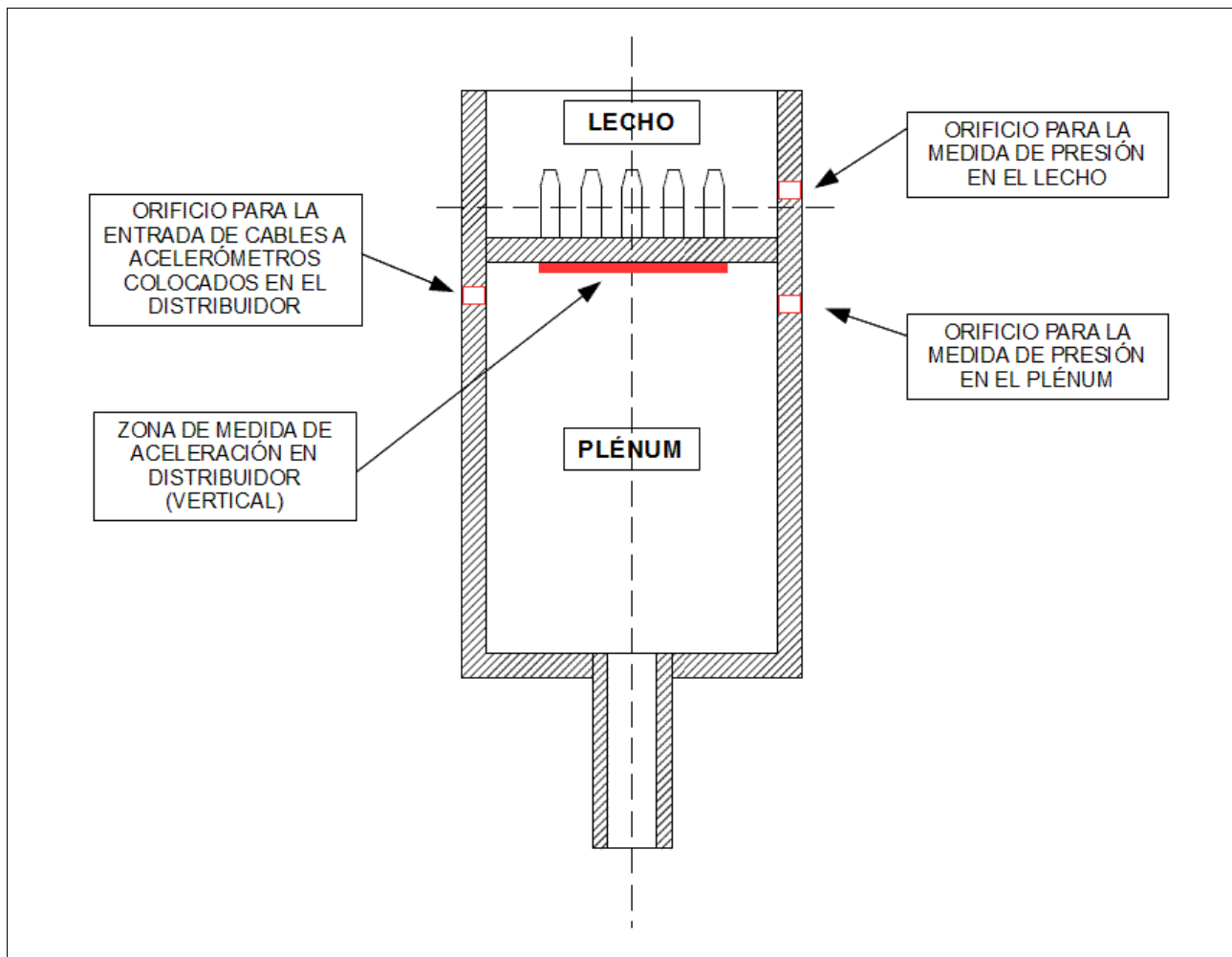


Figura 5.1.1.- Disposición de sensores de presión y sensores de aceleración en distribuidor.-

Todas estas modificaciones realizadas sobre el reactor (situación de los soportes) y la disposición de los sensores se detallan a lo largo de este capítulo. En el punto 5.6 ("procedimiento de medida definitivo"), se muestra la disposición final, que es el resultado de todas las pruebas realizadas, y que será la disposición con la que se hagan las pruebas definitivas.

5.2- CRITERIO DE VALIDACIÓN DE LAS MEDIDAS DE VIBRACIÓN:

En este apartado se establecen los criterios a seguir para afirmar que los resultados obtenidos a partir de un sensor de acelerometría son comparables a los de un sensor de presión y, por tanto, válidos para el propósito de este trabajo.

El primer criterio que deben cumplir las PSD de vibración para que puedan compararse con las PSD de presión es que el reparto de la potencia a lo largo del espectro se concentre en el rango de interés (de 0 a 10Hz). La calidad de la señal será mayor cuanto más baja sea la amplitud de las componentes de alta frecuencia (>10Hz) (Johnsson, 2000). Para comprobar esta condición, lo más conveniente es visualizar las PSD utilizando escala logarítmica en ambos ejes.

Como ejemplo, en la siguiente figura se representa una PSD de presión (verde) y una PSD de vibración (azul). El espectro de presión indica la existencia de una componente fundamental, situada alrededor de los 4Hz. Las componentes situadas por encima de los 10Hz están muy próximas a 0. Es decir, la mayor parte de la potencia del espectro se concentra en un solo punto. En cambio, en el espectro de vibración las componentes se reparten a lo largo de todo el espectro y no hay ninguna componente que destaque respecto a las demás.

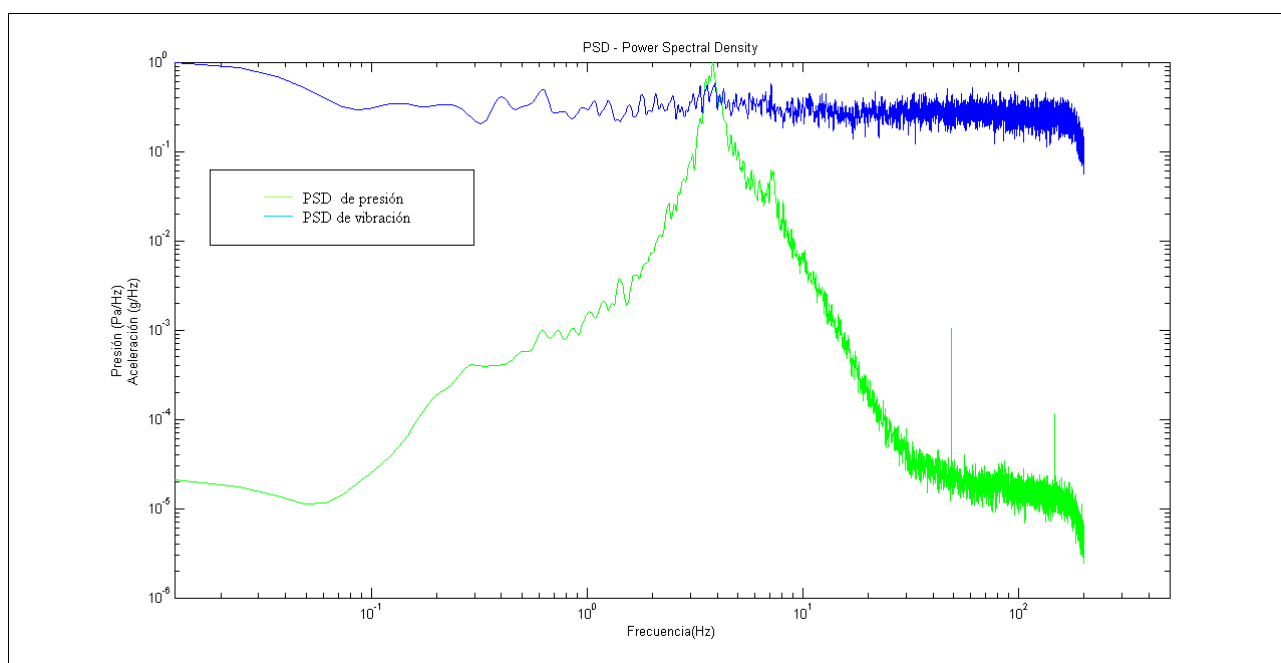


Figura 5.2.1.- Ejemplo de PSD.-

La PSD de vibración, de la figura anterior representa un claro ejemplo de señal no válida para nuestro propósito. Las pruebas que se realicen en este proyecto, descritas a lo largo de este capítulo, tienen por objeto tratar de obtener una PSD de vibración lo más parecida posible a la PSD de presión que se obtenga en cada condición.

Una vez obtenida una PSD de vibración con una sola frecuencia diferenciada, se comparará dicha frecuencia con la que proporciona las medidas de presión. Si ambas frecuencias coinciden, o están razonablemente próximas, se dará por buena la condición de medida

5.3- PRIMERA DISPOSICIÓN:

En la Figura 5.3.1, se expone la colocación de los soportes y la disposición de los sensores con las que se llevaron a cabo las primeras medidas:

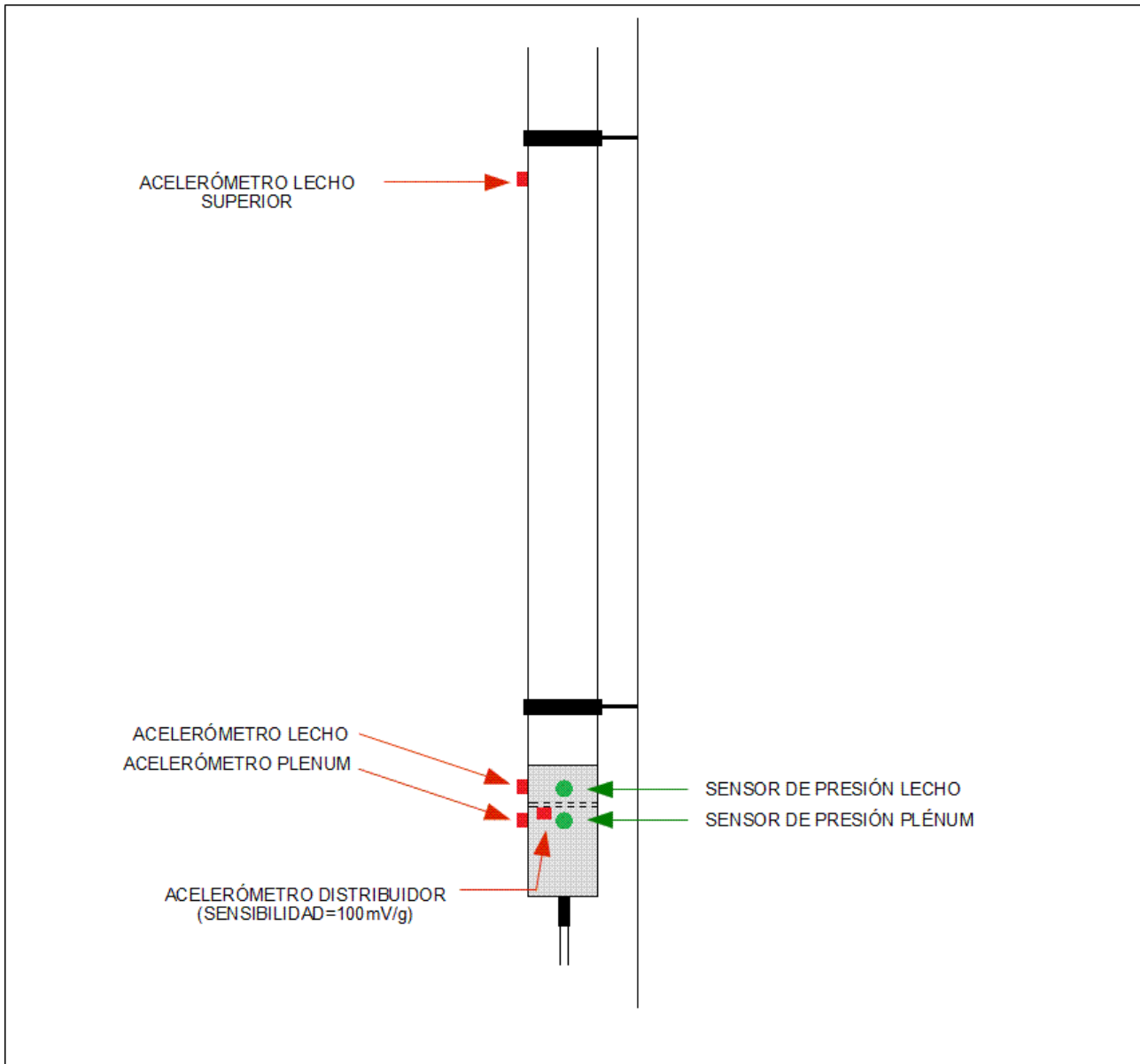


Figura 5.3.1.- Primera disposición de soportes y sensores.-

Las amplitudes de todas las señales registradas, ponen de manifiesto que todos los sensores son capaces de detectar el fenómeno de fluidización y que todos lo detectan en el mismo momento. Esto supone el primer paso para poder determinar que esta primera disposición de soportes y sensores podría ser válida para el objetivo de este proyecto.

A continuación deberá determinarse, en el dominio de la frecuencia, si las señales de los sensores de presión y vibración son equiparables.

También deberá comprobarse si es conveniente aplicar la Transformada de Hilbert a la señal de acelerometría, como se explicó en el capítulo 1 (Introducción).

La comparación de las señales de presión y vibración se ha realizado a través del estudio de todos los puntos de medida, en todas las condiciones de caudal. A modo de ejemplo ilustrativo, en este capítulo se han expuesto solamente las medidas de presión y vibración, en la condición más representativa, que se ha considerado que es la de 250 l/min. Se han representado las medidas de los sensores del lecho porque el sensor de presión y el de vibración se colocaron a la misma altura y resultan los más adecuados para ser comparados.

En la siguiente gráfica se pueden ver, por este orden, las PSD de: Presión en el lecho, Vibración en el lecho y Vibración en el lecho utilizando la Transformada de Hilbert.

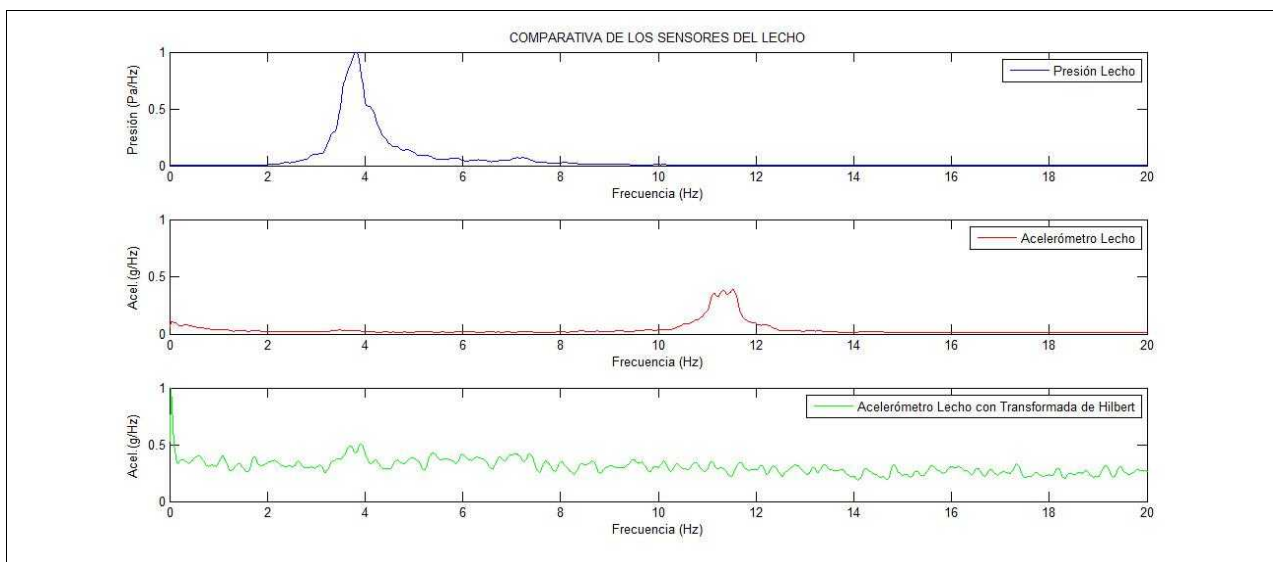


Figura 5.3.2.- Comparativa entre sensores del lecho (1ª disposición).-

Conclusiones de la primera disposición:

- ⤴ Las PSD procedentes de los sensores de presión presentan un pico situado entre 3 y 4 Hz. perfectamente definido. Esto significa que estos sensores son capaces de detectar la fluctuación de presión producida por las burbujas. Por tanto, son capaces de detectar la fluidización existente.
- ⤴ Las PSD de señales procedentes de sensores de vibración y a las que no se ha aplicado la transformada de Hilbert, presentan picos que, en algunos casos coinciden con las señales de presión, pero en otros muchos no. Por ello, no se puede establecer una equivalencia entre estas señales y las de presión, y se ha de determinar que estas señales no son válidas.
- ⤴ Las PSD de señales procedentes de sensores de vibración y a las que sí se ha aplicado la transformada de Hilbert, no reflejan ningún pico, por lo que tampoco existe equivalencia

con los sensores de presión. El motivo por el que no se obtienen estos picos es porque la morfología del lecho impide la transmisión de la vibración en un rango medible por los acelerómetros. Por esta razón, en las siguientes configuraciones de medida se cambiará la posición de las bridas que sostienen el reactor.

- ✦ Aunque no se ha representado en la figura 5.3.2, la señal procedente del sensor de vibración en el plenum proporciona unos resultados prácticamente iguales a los obtenidos en el lecho (zona inferior). Por ello, en esta disposición de medida, no aporta nada el disponer de dos sensores en esa zona.
- ✦ El análisis de las señales procedentes del sensor de vibración colocado en el lecho (zona superior) no aporta ninguna información de interés, tanto si se le aplica la Transformada de Hilbert como si no se aplica. Por esta razón no se han reflejado sus resultados en la figura 5.3.2. Las PSD solo reflejan componentes a baja frecuencia, que se asocian a la vibración estructural del reactor. (De Martín, 2010)

5.4- SEGUNDA DISPOSICIÓN:

Dada la falta de resultados positivos en la primera disposición, se decidió realizar los siguientes cambios:

- ✦ Se modificó la posición de la brida inferior. En la primera disposición se colocó sobre la pieza de poli-metil-metacrilato, a 70mm de distancia del distribuidor. En esta disposición se buscó la posición más baja posible y se colocó en la parte inferior del plenum.
- ✦ Se modificó la posición del sensor de vibración colocado en el plenum, que pasó a la zona inferior de la pieza de poli-metil-metacrilato, zona muy cercana al sensor ya existente en el lecho. El objetivo de este cambio es comparar los resultados de dos sensores colocados en la misma zona pero sobre distintos materiales. Esta comparación tiene por objeto determinar las diferencias que pueden existir a la hora de medir sobre diferentes materiales.
- ✦ Se modificó la posición del sensor colocado en la zona alta del lecho, pasando al distribuidor en dirección vertical. El punto de medida es el mismo que el del sensor ya existente en el distribuidor. El objeto de colocar dos sensores en la misma posición es el de comparar los resultados obtenidos con sensores de diferentes sensibilidades, dado que uno de ellos es de 100mV/g y el otro es de 1000mV/g.

En la Figura 5.4.1 se expone la colocación de los soportes y la disposición de los sensores con las que se llevaron a cabo las segundas medidas:

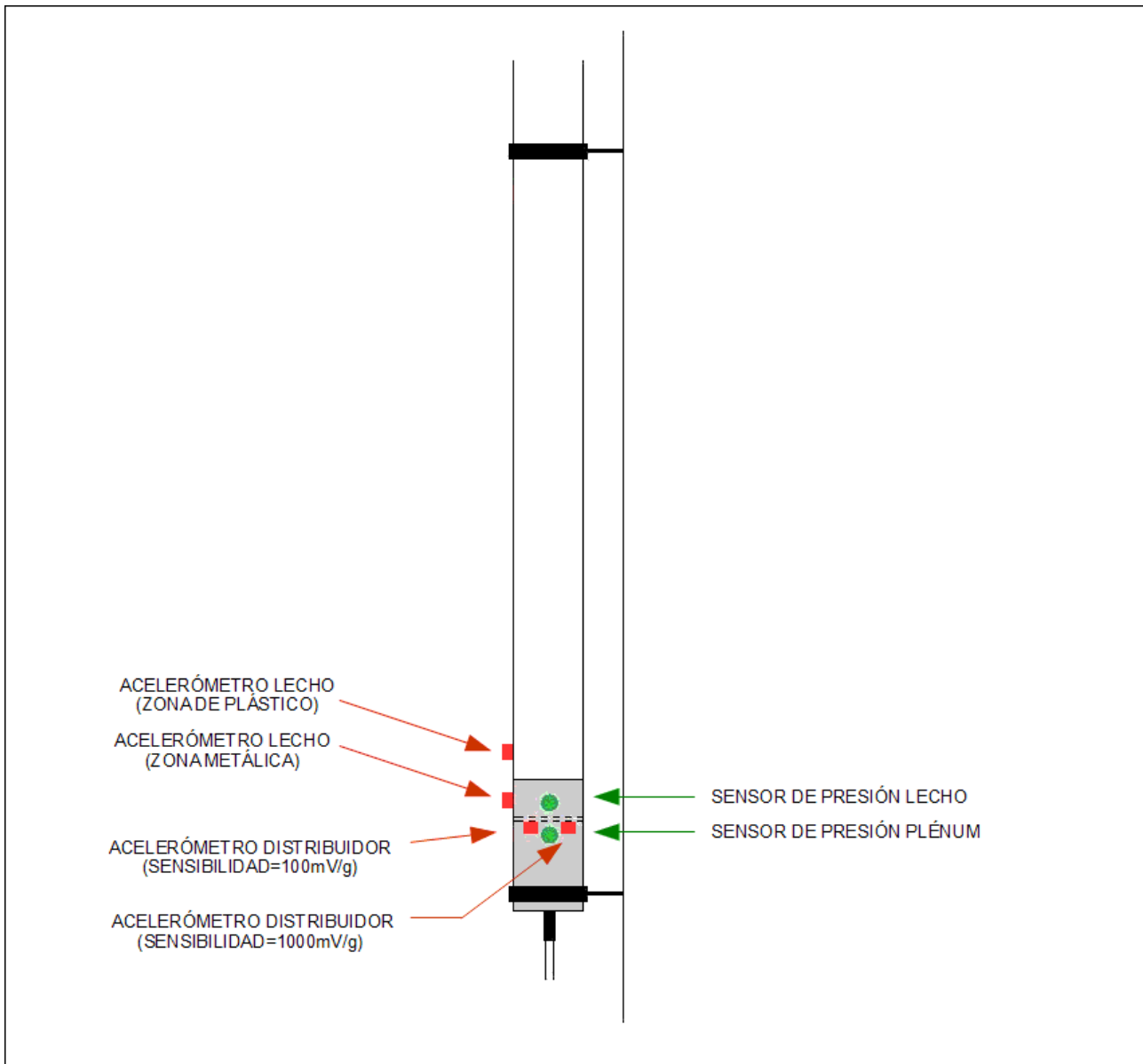


Figura 5.4.1.- Segunda disposición de soportes y sensores.-

Al igual que en la primera disposición, se han expuesto las medidas de presión y vibración tomadas en la condición de 250 l/min. Igualmente, se han representado solamente las medidas de los sensores del lecho (zona metálica).

En la siguiente gráfica se pueden ver, por este orden, las PSD de: Presión en el lecho, Vibración en el lecho y Vibración en el lecho utilizando la Transformada de Hilbert.

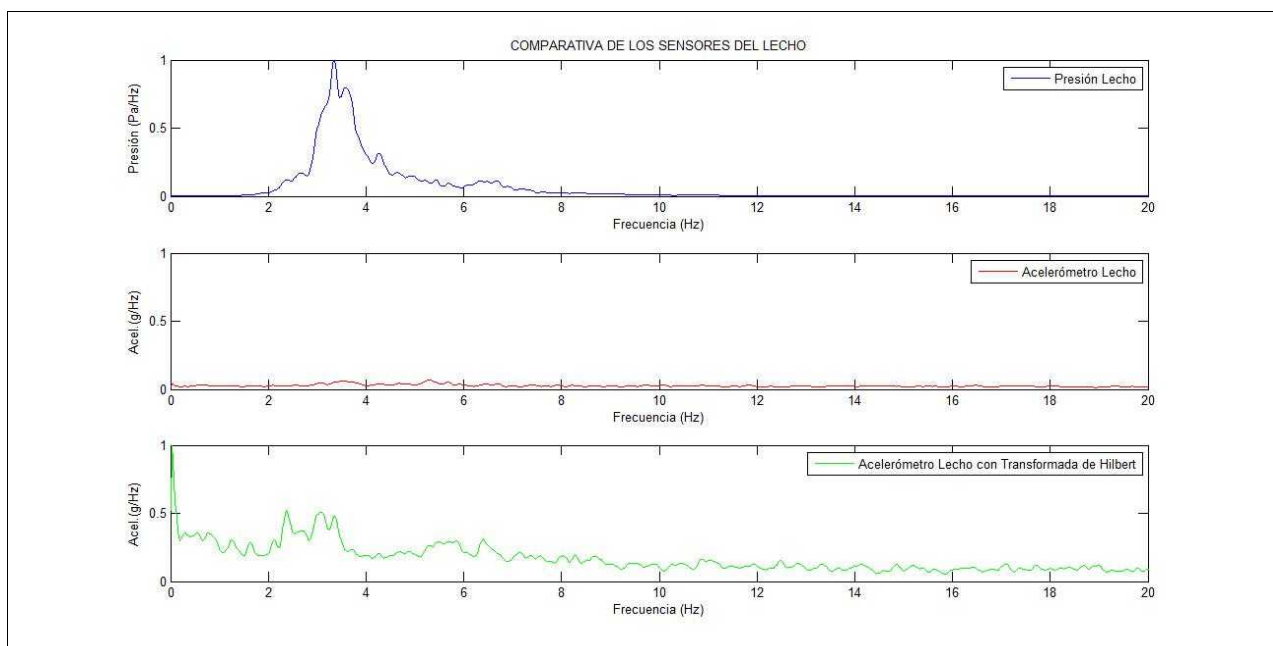


Figura 5.4.2.- Comparativa entre sensores del lecho (2ª disposición).-

Conclusiones de la segunda disposición:

- ⤴ Las PSD correspondientes a los sensores de presión continúan teniendo un pico situado entre 3 y 4 Hz. La posición de los sensores no ha sufrido ningún cambio, por lo que se deduce que el cambio en la posición de los soportes no genera cambios en las señales de los sensores de presión.
- ⤴ Las PSD correspondientes a los sensores de vibración, como ocurría en la primera disposición, no ponen de manifiesto equivalencias con las PSD de los sensores de presión. La posición de la brida inferior, cercana a los acelerómetros, pudiera estar impidiendo que la estructura vibre en un rango de frecuencias dentro del espectro medible por el acelerómetro, y por ello, el tratamiento de la envolvente no refleja la dinámica de lecho. Por esta razón, esta disposición no se puede establecer como definitiva.
- ⤴ La figura 5.4.2 solamente muestra las PSD de las señales procedentes del sensor de vibración colocado en el lecho (zona metálica). La comparación de los datos de este sensor con los del sensor del lecho colocado en el plástico, pone de manifiesto alguna diferencia. Los datos provenientes del sensor colocado en el plástico, presentan mayor cantidad de componentes de baja frecuencia (<10Hz). Aunque ninguno de los sensores aporta resultados positivos, en la siguiente disposición se continuará midiendo en ambos puntos para estudiar las diferencias encontradas.
- ⤴ Las señales procedentes de los dos sensores de vibración colocados en el distribuidor no presentan ninguna frecuencia característica, por lo que no se han expuesto. Entre ambas señales no existen diferencias sustanciales. No obstante, sí se aprecia alguna diferencia que hace pensar que pudieran aportar alguna conclusión sobre la conveniencia de utilizar sensores de una u otra sensibilidad. Por ello, en las siguientes disposiciones, se continuará midiendo con estos sensores en estos puntos.

5.5- TERCERA DISPOSICIÓN:

En la Figura 5.5.1 se expone la colocación de los soportes y la disposición de los sensores con las que se llevaron a cabo las terceras y definitivas medidas:

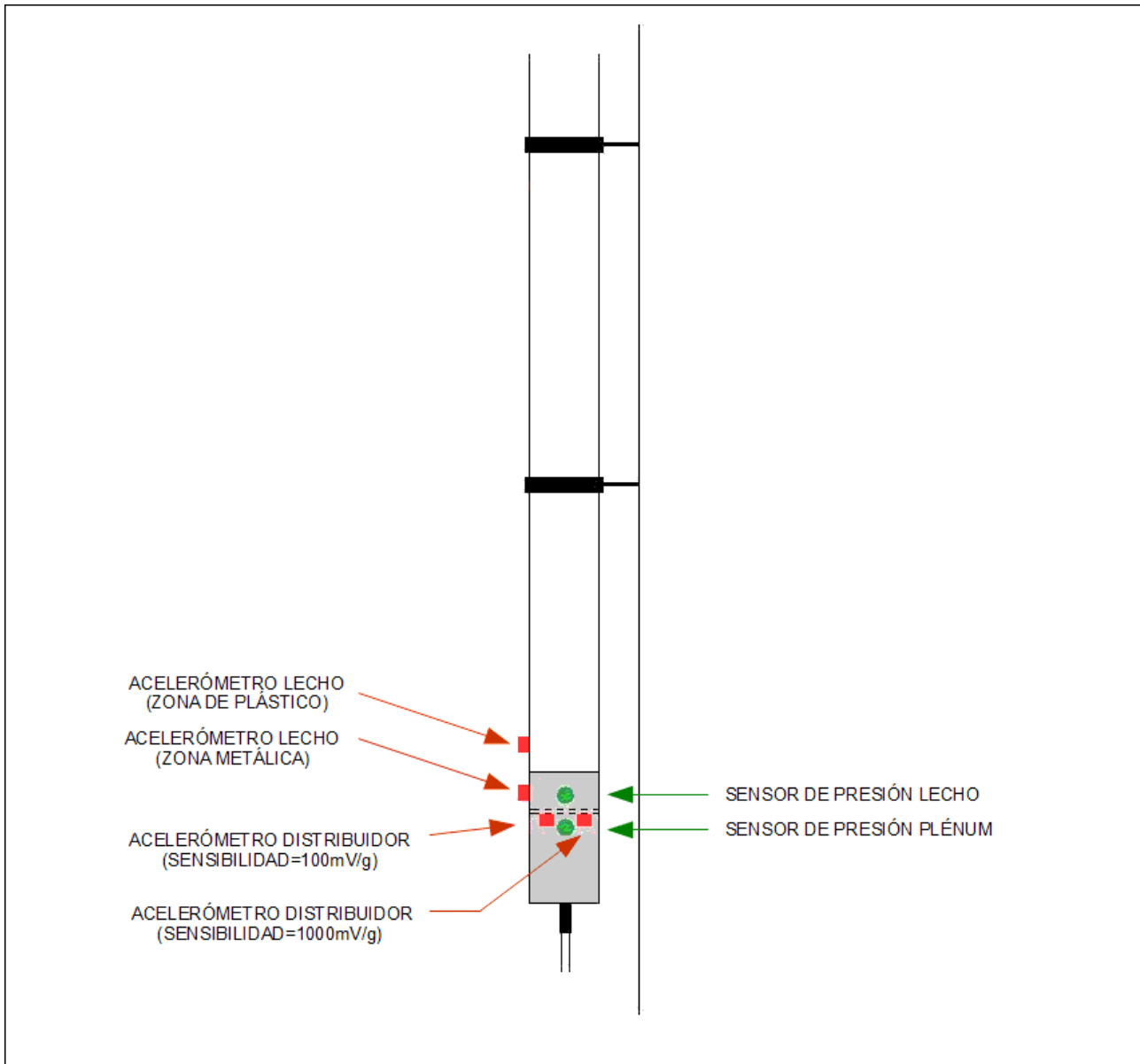


Figura 5.5.1.- Tercera disposición de soportes y sensores.-

Al igual que en la primera y segunda disposición, se han expuesto las medidas de presión y vibración tomadas en la condición de 250 l/min, representándose las medidas de los sensores del lecho.

En la siguiente gráfica se pueden ver, por este orden, las PSD de: Presión en el lecho, Vibración en el lecho y Vibración en el lecho utilizando la Transformada de Hilbert.

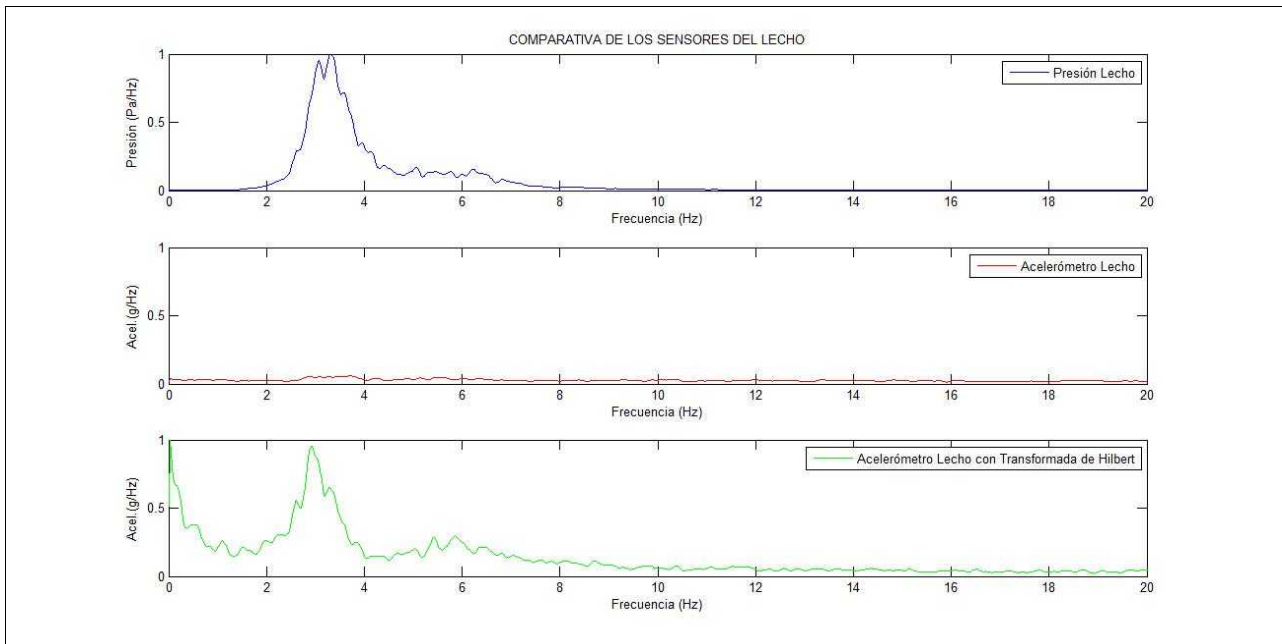


Figura 5.5.2.- Comparativa entre sensores del lecho (3ª disposición).-

Conclusiones de la tercera disposición:

- ✧ Las PSD correspondientes a los sensores de presión continúan teniendo un pico situado entre 3 y 4 Hz, reflejando la frecuencia dominante del lecho. En estos sensores no se ha realizado ningún cambio.
- ✧ Las PSD de las señales correspondientes a los sensores de vibración, a las que no se ha aplicado la transformada de Hilbert, no presentan equivalencias con las señales de presión.
- ✧ Las PSD de las señales correspondientes a los sensores de vibración, a las que sí se ha aplicado la transformada de Hilbert, reflejan cierta equivalencia con los sensores de presión. Por tanto, tal y como señaló De Martín (2010), es conveniente realizar la transformada de Hilbert para describir la dinámica del lecho.
- ✧ La comparación de los resultados obtenidos con las diferentes disposiciones de bridas (figuras 5.3.2, 5.4.2 y 5.5.2) refleja que la posición de dichas bridas es un parámetro crítico para poder caracterizar la vibración de la estructura con los acelerómetros empleados.

Se establece, por tanto, esta tercera disposición de soportes y sensores, como la más adecuada, entre las que se han probado, para que exista una correspondencia entre las medidas de presión y las medidas de vibración.

5.6- PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DEFINITIVO:

De acuerdo a todo lo estudiado hasta el momento, y lo expuesto en el Capítulo 2 de este proyecto, se establece la tercera disposición de soportes y sensores, como la más adecuada para que exista una correspondencia entre las medidas de presión y las medidas de vibración. Por ello, se realizarán las medidas definitivas utilizando esta disposición.

En cuanto al tratamiento de las señales que es conveniente realizar, las conclusiones son las siguientes:

- ⤴ La aplicación de la Transformada de Hilbert sobre la señal de los sensores de vibración, da como resultado, una PSD que presente equivalencias importantes con las señales procedentes de los sensores de presión. Por tanto, se utilizará la Transformada de Hilbert en todos los procesamientos de las señales de acelerometría.
- ⤴ A lo largo de todas las pruebas, se ha podido comprobar que es conveniente utilizar un filtro paso-bajo en las señales procedentes de sensores de vibración. Las medidas realizadas sin este filtro muestran componentes a mayor frecuencia que distorsionan la PSD. En otros estudios, de reactores similares, se ha determinado que la frecuencia de filtrado debe estar situada en 20Hz (De Martín, 2010). Durante las pruebas, se han realizado medidas con filtros a 20, 40, 100 y 200Hz. El resultado ha sido siempre muy similar. Las pruebas definitivas se realizarán con un filtrado a 40Hz.
- ⤴ El rango de interés de los análisis realizados en este proyecto están situados a baja frecuencia ($<10\text{Hz}$), por lo que, en un principio, no sería conveniente utilizar filtros paso-alto durante el procesado. Por otro lado, existe un fenómeno vibratorio relacionado con el movimiento del reactor, llamado “ruido estructural”. Este fenómeno genera componentes vibratorias a baja frecuencia dificultando el análisis. Para eliminar estas componentes es necesario utilizar un filtro paso-alto situado a la frecuencia adecuada. La frecuencia relacionada con el ruido estructural depende de las características constructivas del reactor. A la hora de establecer la frecuencia de corte adecuada debe tenerse en cuenta no eliminar ninguna componente de interés. Basándose en estudios realizados anteriormente con un reactor de características muy similares (De Martín, 2010), se decide establecer esta frecuencia de corte en 0,16Hz.
- ⤴ Para realizar el cálculo de la PSD de una señal es conveniente dividir la señal adquirida en bloques o “promedios”. Cuantos menos promedios se utilicen, mayor será la resolución en frecuencia. Disponer de una resolución en frecuencia excesivamente alta puede ocasionar que no se distingan correctamente las componentes fundamentales. Tras las pruebas realizadas, se decide utilizar, en las medidas definitivas, 40 promedios.

Con todo lo dicho anteriormente, se establece una pauta de medida cuyo esquema sería el representado en la siguiente figura:

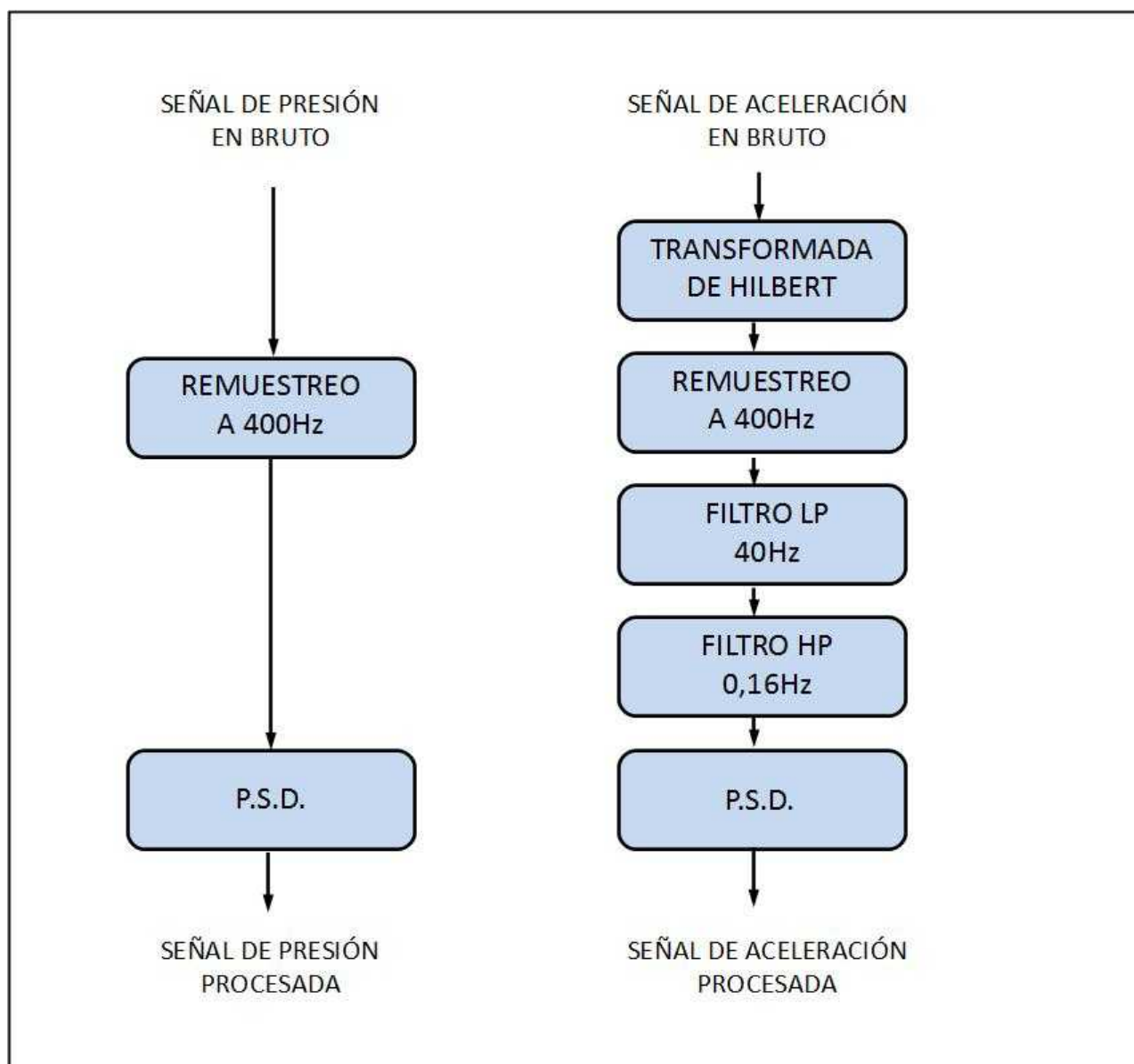


Figura 5.6.1.- Procesado de señales de presión y acelerometría.-

6.- RESULTADOS OBTENIDOS (LECHO DE 70 mm DE ALTURA):

6.1- RESULTADOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO:

Como se ha definido anteriormente, el método experimental consiste en realizar una serie de medidas de presión y vibración, variando, entre cada una de ellas, el caudal de aire. De acuerdo a la sección del lecho, cada caudal se corresponde con una velocidad del aire. En la Tabla 6.1 se expone la correspondencia entre caudal y velocidad del aire, y el grado de fluidización en el que se encuentra el lecho en cada medida:

Caudal (l/min)	Velocidad del aire (m/s)	Descripción visual del estado del lecho
0	0	Sin fluidización.
50	0,22	
100	0,43	
150	0,65	Fluidización con burbuja pequeñas. Cerca de mínima fluidización.
200	0,87	Fluidización con burbujas grandes. Totalmente fluidizado.
250	1,08	
300	1,3	
350	1,52	Fluidización burbujeante parcialmente turbulenta. Fluidización vigorosa.
400	1,73	
450	1,95	
500	2,17	

Tabla 6.1.1.- Correspondencia entre caudal y velocidad del aire.-

Las pruebas realizadas ponen de manifiesto que comienza a existir fluidización en el escalón de velocidad de 0,65 m/s. Por tanto, visualmente, se puede determinar que la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) se encuentra entre 0,43 y 0,65 m/s.

Las pruebas realizadas con velocidades de aire de 0,87 m/s y superiores se ve una fluidización con burbuja grande. A partir de la velocidad de 1,52 m/s, el burbujeo comienza a ser parcialmente turbulento, incrementándose las turbulencias en la medida que aumenta la velocidad.

A continuación, se determinarán los niveles de variación de presión y vibración, para cada una de las velocidades de aire. Este cálculo tiene varias finalidades:

- ⤴ Verificar que los sensores de vibración comienzan a detectar fluidización al mismo tiempo que los sensores de presión.
- ⤴ Comprobar que los niveles de vibración aumentan con la velocidad, de una forma proporcional a como lo hacen los niveles de variación de presión.
- ⤴ Determinar a qué velocidad del aire comienza a haber fluidización, es decir, cual es la “velocidad mínima de fluidización” (U_{mf}).

Los valores de desviación típica de todos los sensores, en cada escalón, se muestran en la figura 6.1.1. Las líneas definidas por la evolución de los puntos, representadas en las gráficas, suponen la estimación de la evolución de la fluidización. El punto de corte de estas líneas con el eje de abscisa, representa la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) (Wilkinson, 1995).

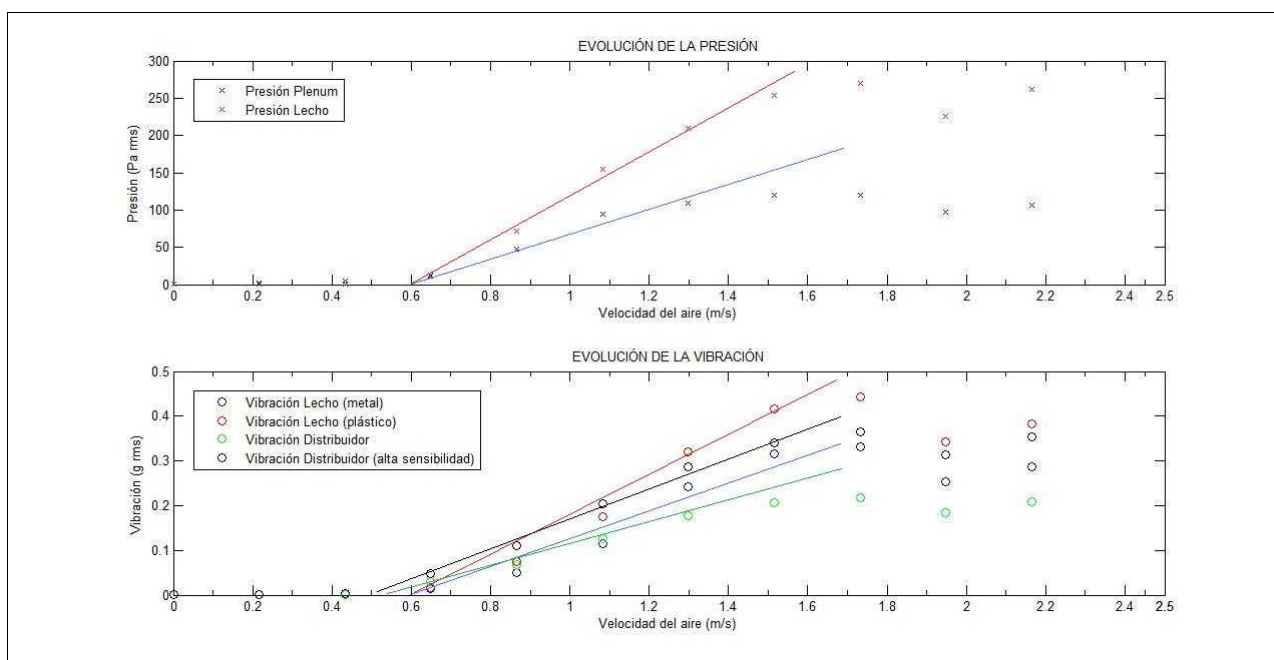


Figura 6.1.1.- Evolución de la presión y vibración en función de la velocidad del aire.-

Las líneas que estiman la evolución de la fluidización sitúan la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}) en el punto de corte entre la línea de estimación y el eje de abscisa. La velocidad resulta ser: **0,6m/s**, que corresponde a **138 l/min**. Por tanto, podemos determinar que el inicio del fenómeno de fluidización tiene lugar entre las condiciones de 100 y 150 l/min. Esto es corroborado por la inspección visual, que en la condición de 150 l/min, nos advierte de los primeros indicios de fluidización (burbujas).

Por otro lado, resulta interesante comprobar que tanto los sensores de presión como los acelerómetros muestran tendencias similares (Figura 6.1.1). Además, tanto los acelerómetros horizontales (identificados como "Vibración Lecho (metal)" y "Vibración Lecho (plástico)") como los acelerómetros verticales ("Vibración Distribuidor" y "Vibración Distribuidor (alta sensibilidad)") obtienen la misma velocidad mínima fluidización. Tan sólo hay una pequeña diferencia en la amplitud registrada por los sensores verticales que se debe a la diferente sensibilidad de ambos.

6.2- RESULTADOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA:

A continuación se exponen los resultados obtenidos al calcular las PSD de las señales adquiridas por los seis sensores.

La figura 6.2.1 muestra las PSD de los sensores de presión, en las diez condiciones de caudal en las que se han registrado los datos:

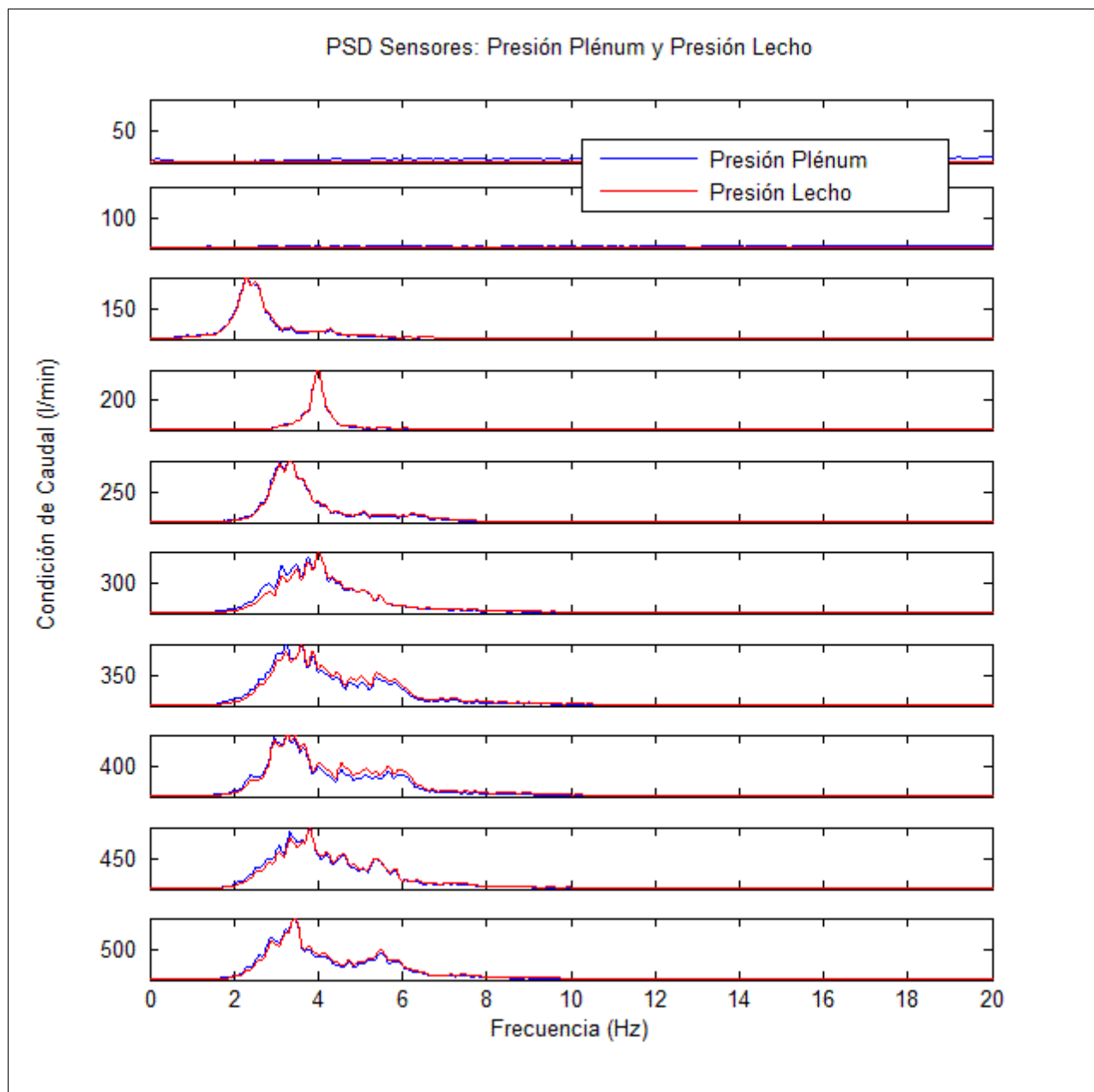


Figura 6.2.1.- PSD. Sensores: Presión Plénum y Presión Lecho. Altura del lecho: 70mm.-

La figura 6.2.2 muestra las PSD de los sensores de vibración situados en el lecho (orientación horizontal), en las diez condiciones de caudal en las que se han registrado los datos:

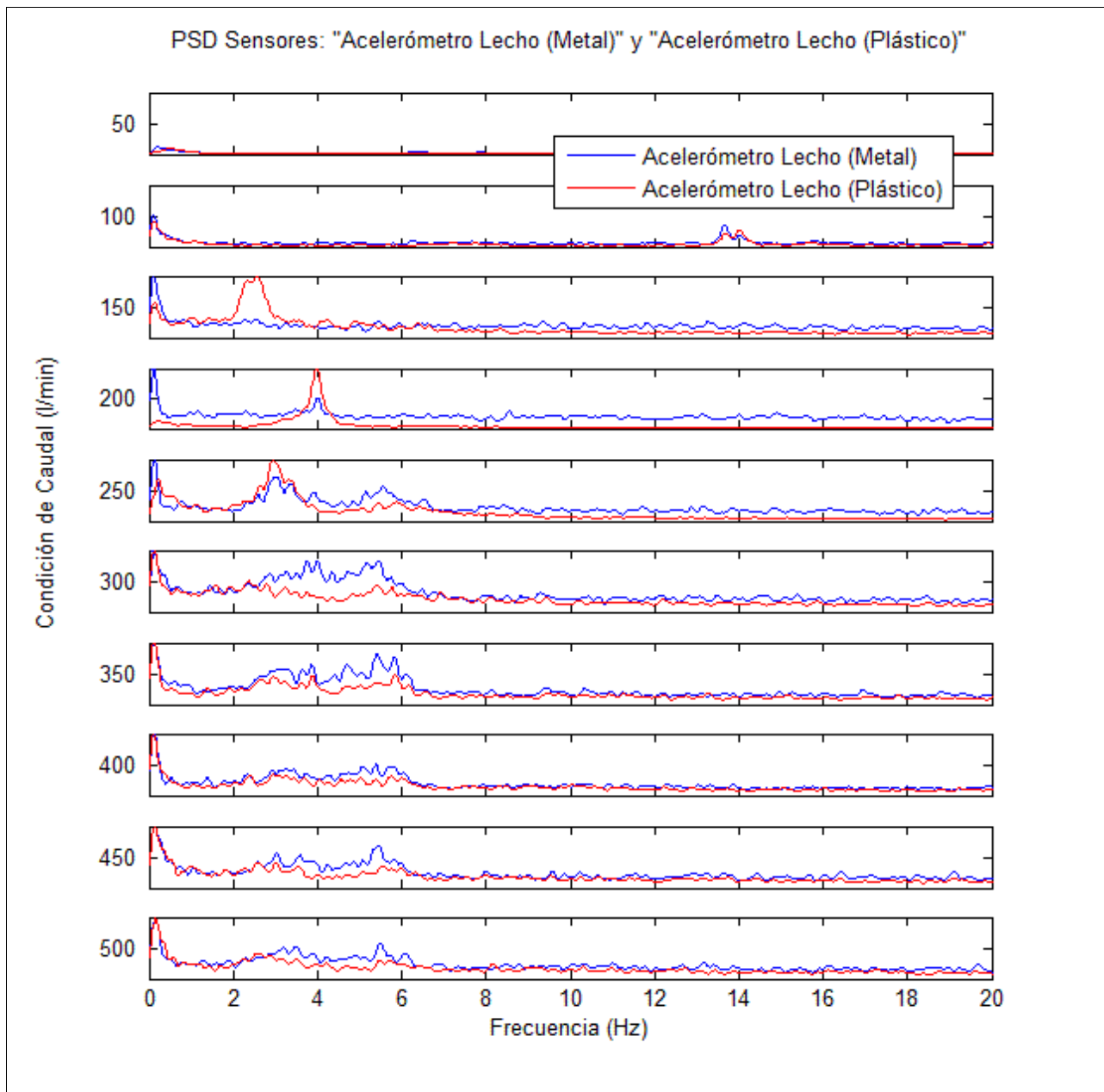


Figura 6.2.2.- PSD. Sensores: Acelerómetros Lecho. Altura del lecho: 70mm.-

La figura 6.2.3 muestra las PSD de los sensores de vibración situados en el distribuidor (orientación vertical), en las diez condiciones de caudal en las que se han registrado los datos:

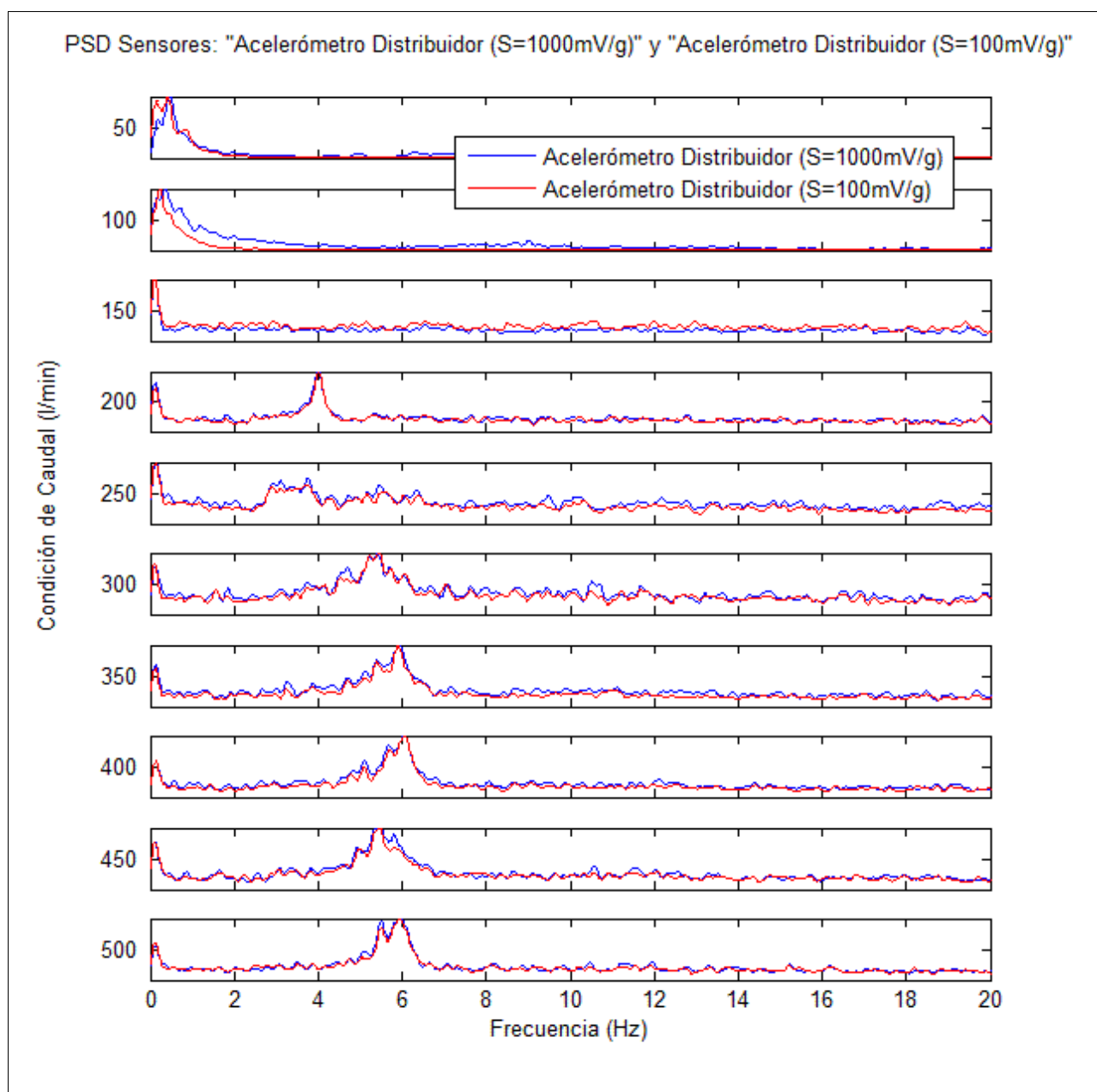


Figura 6.2.3.- PSD. Sensores: Acelerómetros Distribuidor. Altura del lecho: 70mm.-

6.3- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

De los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas en el lecho de 70mm de altura, se puede realizar el siguiente análisis:

- ⤴ En las condiciones de 50 y 100 l/min, en las que no existe fluidización, las PSD de los sensores de presión no muestran ninguna frecuencia característica. Tampoco lo hacen los sensores de vibración. Los sensores de vibración presentan componentes entre 0 y 0,5Hz, que podrían estar relacionados con el ruido estructural. Los sensores de vibración situados en el distribuidor presentan estas componentes más acentuadas.
- ⤴ En la condición de 150 l/min, correspondiente a fluidización incipiente, las PSD de los sensores de presión muestran un pico situado en 2,4Hz. El único sensor de vibración que refleja un resultado similar es el situado en el lecho, sobre el plástico. Esto puede deberse a que la transmisión de la vibración a través del PMMA es más efectiva que a través de PMMA y aluminio, como sucede para el sensor situado sobre metal.
- ⤴ En las condiciones de caudal superior a 150 l/min, todas las PSD muestran picos situados entre 3 y 4Hz.
- ⤴ Por regla general, en todos los sensores, a partir de 250 l/min, la banda de frecuencia característica se hace más ancha, aparecen múltiples picos, y se hace más difícil definir el pico más alto. Este fenómeno podría estar relacionado con la existencia de turbulencias en el lecho y/o con el cambio de régimen de fluidización.

Con el propósito de comparar visualmente los resultados obtenidos con los diferentes sensores, se han seleccionado tres velocidades del aire, que corresponden a las tres condiciones de fluidización que presenta el lecho durante las pruebas. Estas condiciones son las siguientes:

- ⤴ 0,43 m/s (100 l/min.): Sin fluidización.
- ⤴ 1,08 m/s (250 l/min.): Fluidización con burbuja estrecha.
- ⤴ 1,95 m/s (450 l/min.): Fluidización con burbuja gruesa con cierta fluidización turbulenta.

En las siguientes figuras se muestran, para cada una de las condiciones mencionadas anteriormente, tres gráficos: En el primero se representan los sensores de presión. En el segundo se representan los sensores de vibración en el lecho. Y en el tercero se representan los sensores de vibración en el distribuidor, en dirección vertical.

Condición: Velocidad del aire: 0,43 m/s. Caudal: 100 l/min.:

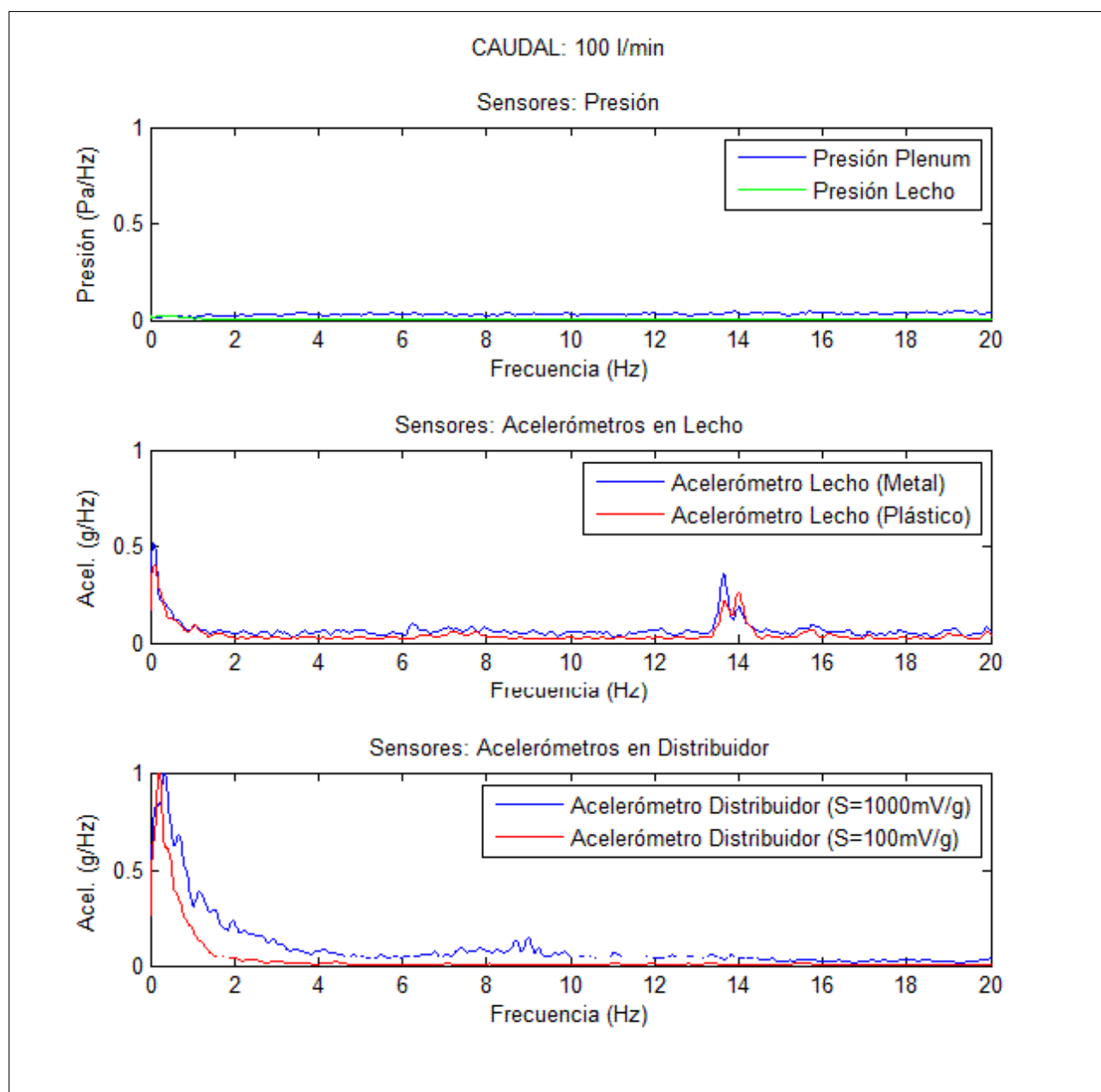


Figura 6.3.1.- Condición de caudal: 100 l/min. (Sin fluidización).-

Condición: Velocidad del aire: 1,08 m/s. Caudal: 250 l/min.:

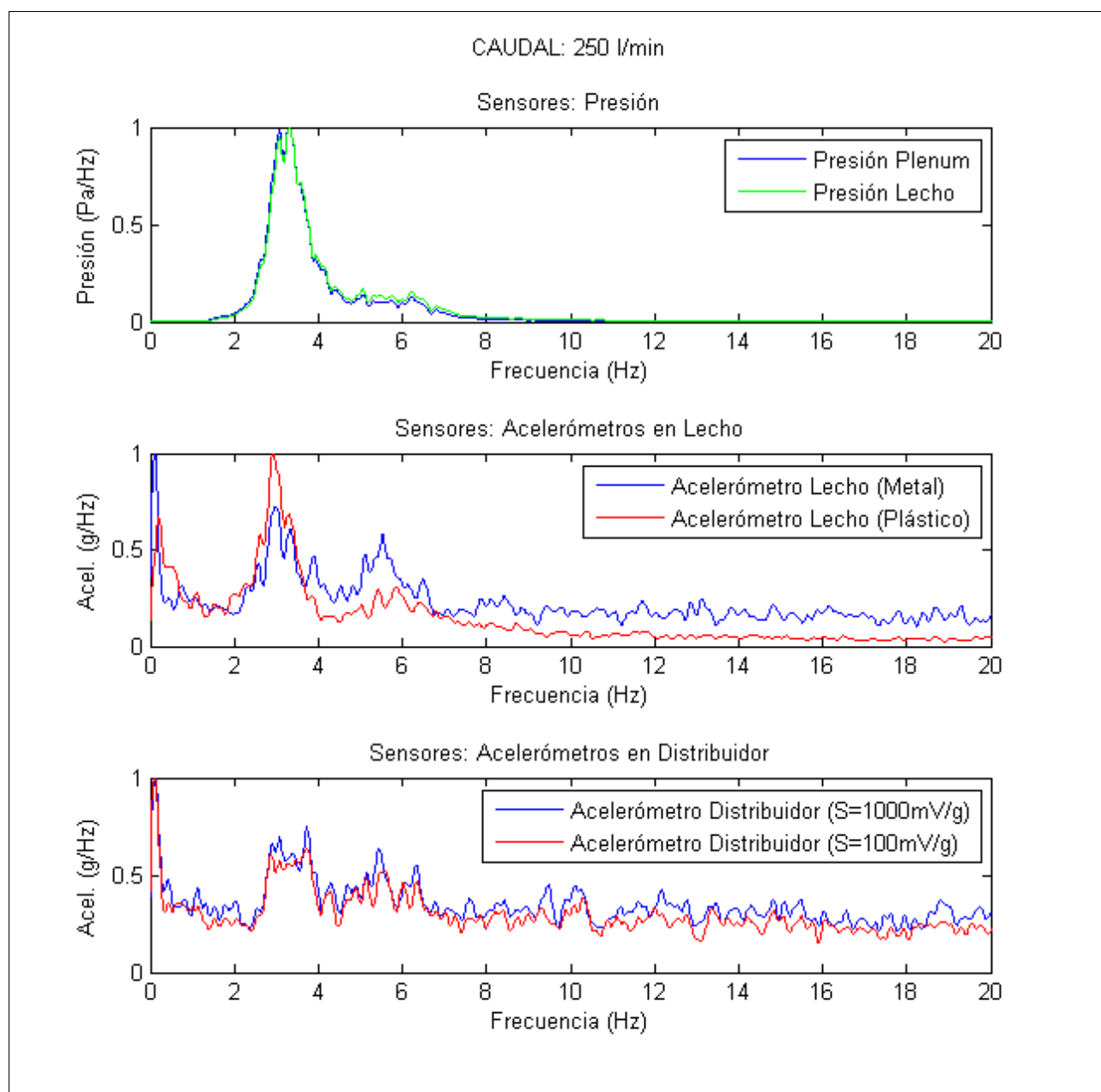


Figura 6.3.2.- Condición de caudal: 250 l/min. (Fluidización con burbuja estrecha).-

Condición: Velocidad del aire: 1,95 m/s. Caudal: 450 l/min.:

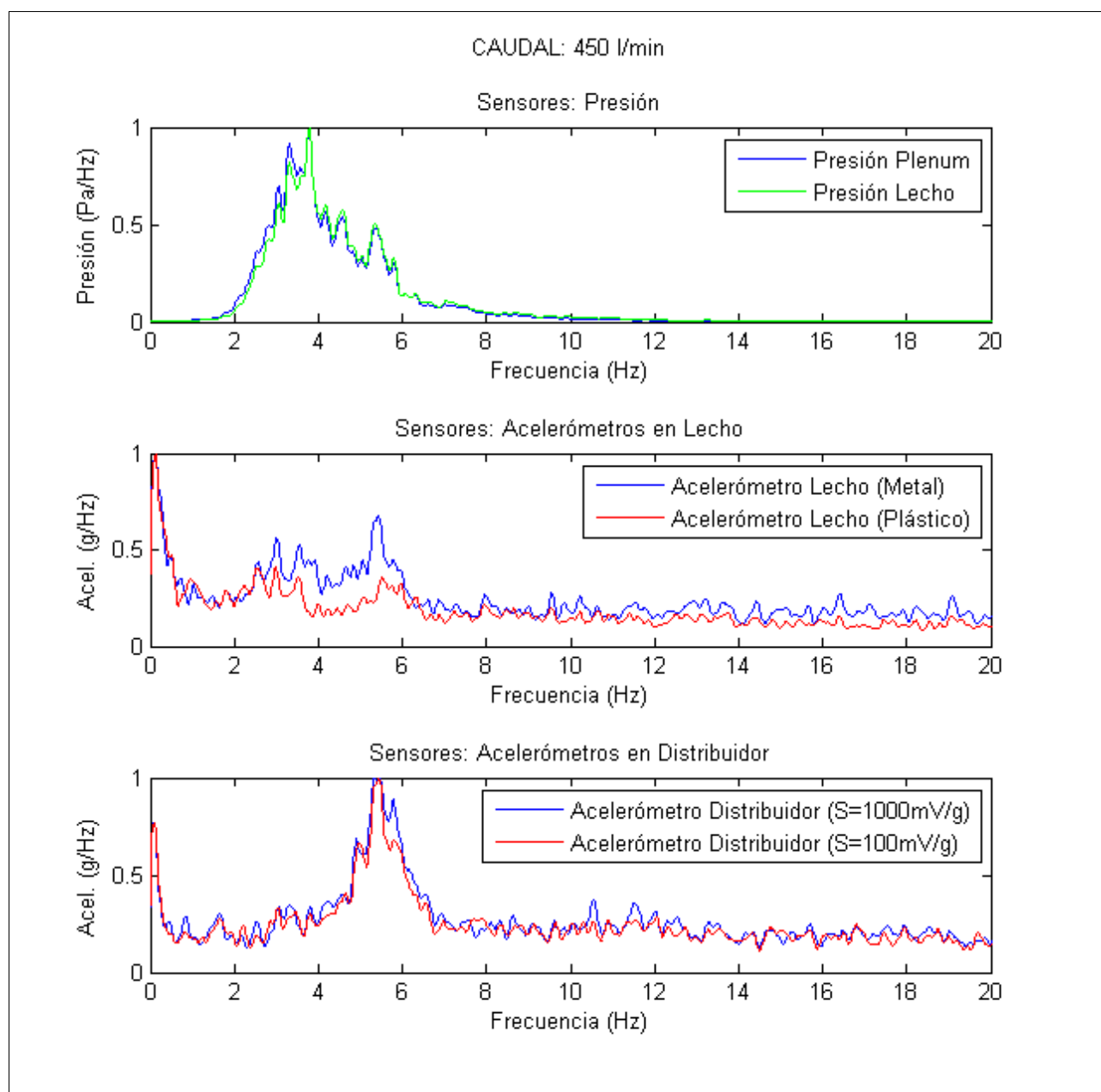


Figura 6.3.3.- Condición de caudal: 450 l/min. (Fluidización con burbuja gruesa).-

6.4- CONCLUSIONES:

A partir de todos los datos expuestos en el apartado 6 (“Resultados obtenidos en las medidas en lecho de 70mm de altura”), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ✧ Los resultados obtenidos a través de los sensores de vibración en la condición de 100 l/min, condición de no fluidización (figura 6.3.1), ponen de manifiesto componentes vibratorias relacionadas con ruido estructural. Este ruido, aunque se aprecia mejor en las primeras condiciones, está presente en todas las medidas, dificultando la identificación de las frecuencias características. En las medidas realizadas se ha utilizado un filtro paso-alto, de 0,16Hz, para tratar de eliminar este ruido. En algunos casos, el resultado no ha sido totalmente satisfactorio, dado que estas componentes se extienden, en el peor de los casos, hasta los 2Hz. Los sensores de vibración colocados en el distribuidor (orientación vertical) presentan mayor ruido estructural a bajas frecuencias, por lo que, en este aspecto, no proporcionan mejores resultados que los sensores colocados en el lecho. Por otro lado, los sensores colocados en el lecho (orientación horizontal) presentan un pico a 14 Hz que puede ser debido a la estructura, ya que desaparece con el incremento del caudal.
- ✧ Una vez el lecho está fluidizado, los sensores de vibración situados en el lecho (horientación horizontal) muestran unas frecuencias características similares a los sensores de presión. Ahora bien, a medida que aumenta la velocidad y aparecen turbulencias en el lecho, se hace más complicado identificar dichas frecuencias, por la aparición de otros picos alrededor (figura 6.3.3). Los sensores situados en el distribuidor no mejoran los resultados obtenidos con los sensores situados en el lecho.
- ✧ En las condiciones de mayor velocidad del aire (figura 6.2.1), aparecen en los espectros de presión, componentes entre 5 y 6Hz, probablemente relacionadas con el cambio de régimen de burbujas pequeñas a burbujas grandes (slugging). Estas componentes también pueden apreciarse en los espectros de vibración. Debe destacarse que los espectros que muestran estas componentes de forma más definida son los de los sensores del distribuidor (figura 6.3.3).
- ✧ En las dos medidas de vibración realizadas sobre el lecho se utilizaron sensores colocados (sobre la pieza de aluminio y sobre la pieza de plástico). Los resultados que se pueden relacionar mejor con las medidas de presión corresponden al sensor colocado sobre el plástico. Estos resultados podrían explicarse por el hecho de que el plástico está en contacto directo con las partículas que componen el lecho, mientras que la parte metálica del lecho no lo está.
- ✧ Los dos sensores situados en el distribuidor miden sobre la misma pieza y en la misma dirección. Su única diferencia es que tienen diferente sensibilidad (100 y 1000 mV/g). No se detectó diferencia alguna en los resultados obtenidos por ambos sensores.
- ✧ Además, es necesario señalar que, a pesar de no haberse incluido en estas figuras, el análisis de las medidas de vibración sin aplicar la transformada de Hilbert, da como resultado espectros no válidos para el propósito de este proyecto. En ellos aparecen componentes de alta frecuencia que hacen imposible distinguir componentes más bajas. Antes de comenzar el proyecto, ya se disponía de datos para pensar que se llegaría a esta conclusión, gracias a

los trabajos de investigación ya realizados (De Martín, 2010). No obstante, se ha querido corroborar esta conclusión con el reactor y las condiciones de medida utilizados en este proyecto.

7.- RESULTADOS OBTENIDOS (LECHO DE 160 mm DE ALTURA):

7.1- RESULTADOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO:

Como se hizo en el apartado 3, en primer lugar se exponen los grados de fluidización que se ha obtenido en los diferentes escalones de caudal/velocidad del aire. Los resultados se pueden ver en la Tabla 7.1.1:

Caudal (l/min)	Velocidad del aire (m/s)	Descripción visual del estado del lecho
0	0	Sin fluidización.
50	0,22	
100	0,43	
150	0,65	Fluidización con burbujas pequeñas. Cerca de mínima fluidización.
200	0,87	Fluidización con burbujas grandes. Totalmente fluidizado. Fenómeno de levantamiento del lecho.
250	1,08	
300	1,3	
350	1,52	Fluidización burbujeante parcialmente turbulenta. Fluidización vigorosa.
400	1,73	
450	1,95	
500	2,17	

Tabla 7.1.1.- Correspondencia entre caudal y velocidad del aire.-

La observación visual del estado del lecho durante las pruebas pone de manifiesto que la fluidización del lecho comienza con la velocidad del aire de 0,65 m/s. La prueba con esta velocidad da como resultado una fluidización casi inapreciable. Existen burbujas, pero éstas son escasas y muy pequeñas. Ello nos hace suponer que en las zonas del lecho en las que no se ven burbujas, existe una fluidización homogénea.

En la prueba realizada a 0,87 m/s, se aprecia un burbujeo grueso, con levantamiento del lecho. El hecho de que se pase, en un solo escalón de velocidad, de fluidización homogénea a burbujeante con levantamiento del lecho, es normal en lechos muy altos y estrechos.

A partir de la velocidad de 1,52 m/s, el burbujeo comienza a ser parcialmente turbulento, incrementándose las turbulencias en la medida que aumenta la velocidad. Las turbulencias dificultan la formación de burbujas grande, y por tanto, también la aparición del fenómeno de levantamiento del lecho.

Al igual que en el lecho de 70 mm, se determinaron las desviaciones típicas de variación de presión y vibración, para cada una de las velocidades de aire. Los valores de desviación típica de todos los sensores, resultaron ser las mismas que con el lecho de 70mm. Por tanto, la estimación de la velocidad mínima de fluidización también es la misma: **0,6m/s**, que corresponde a **138 l/min..**

7.2- RESULTADOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA:

A continuación se exponen los resultados obtenidos al calcular las PSD de las señales adquiridas por los seis sensores.

La figura 7.2.1 muestra las PSD de los sensores de presión, en las diez condiciones de caudal en las que se han registrado los datos:

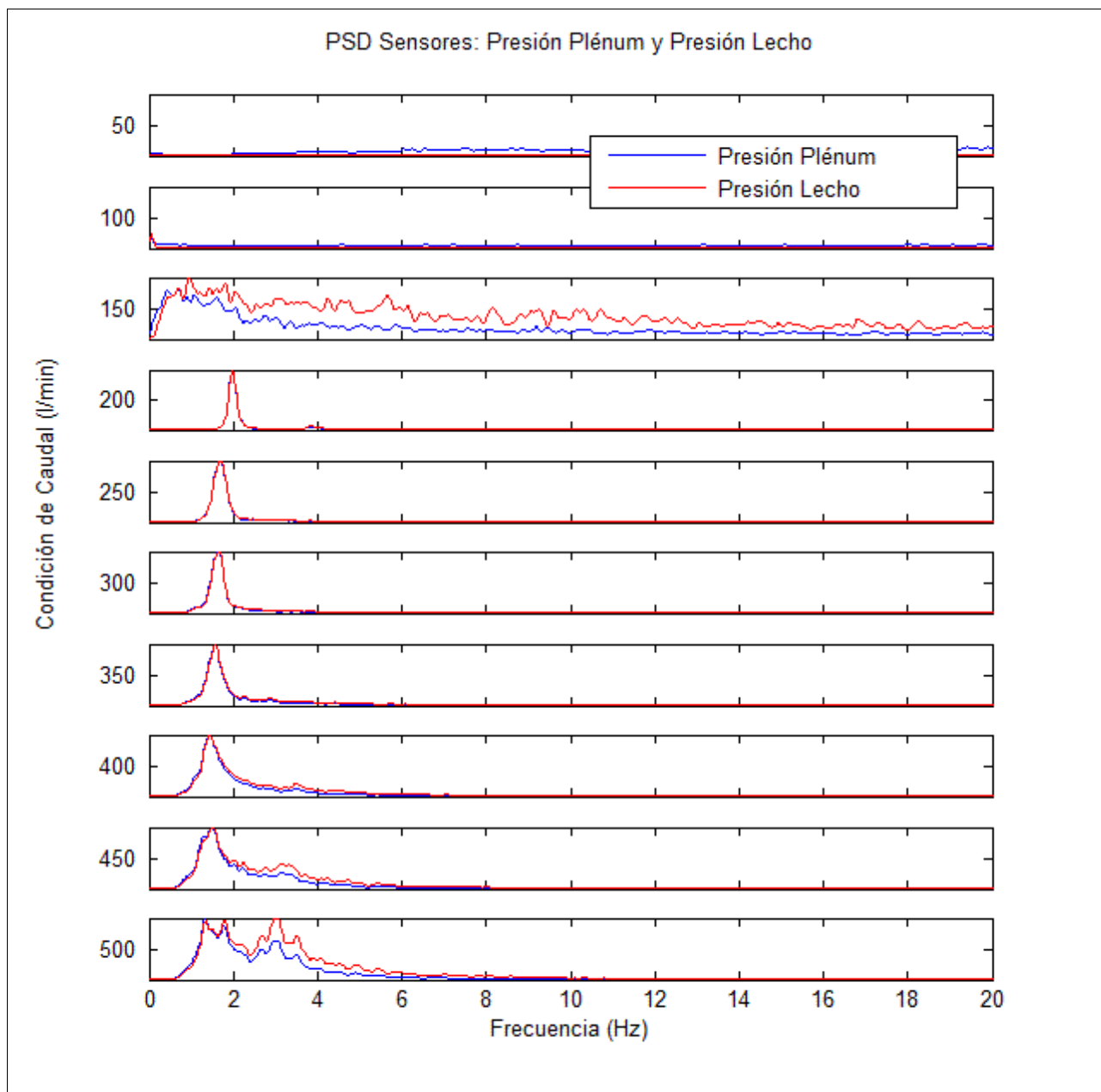


Figura 7.2.1.- PSD. Sensores: Presión Plenum y Presión Lecho. Altura del lecho: 160mm.-

La figura 7.2.2 muestra las PSD de los sensores de vibración situados en el lecho (orientación horizontal), en las diez condiciones de caudal en las que se han registrado los datos:

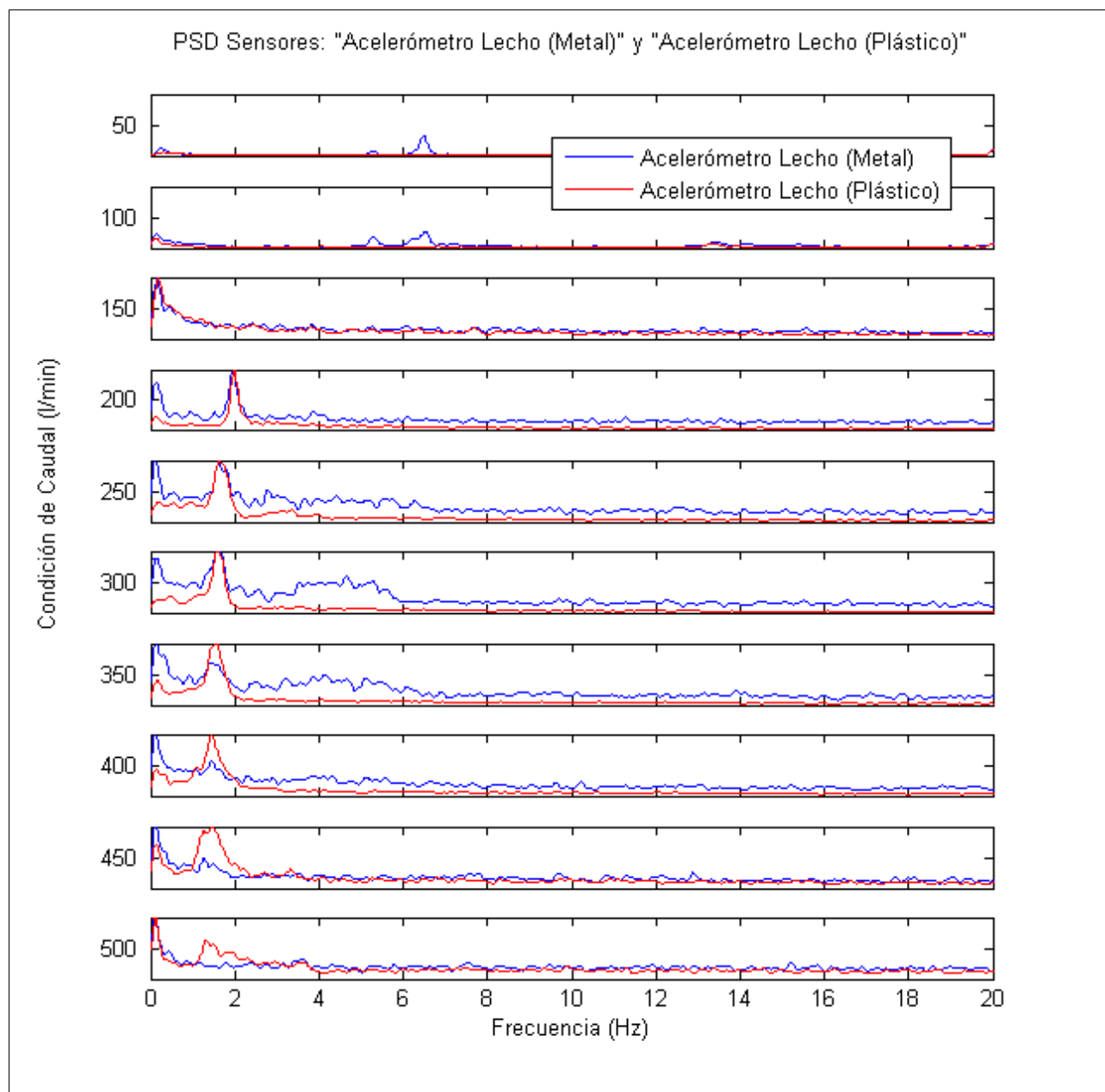


Figura 7.2.2.- PSD. Sensores: Acelerómetros Lecho. Altura del lecho: 160mm.-

La figura 7.2.3 muestra las PSD de los sensores de vibración situados en el distribuidor (orientación vertical), en las diez condiciones de caudal en las que se han registrado los datos:

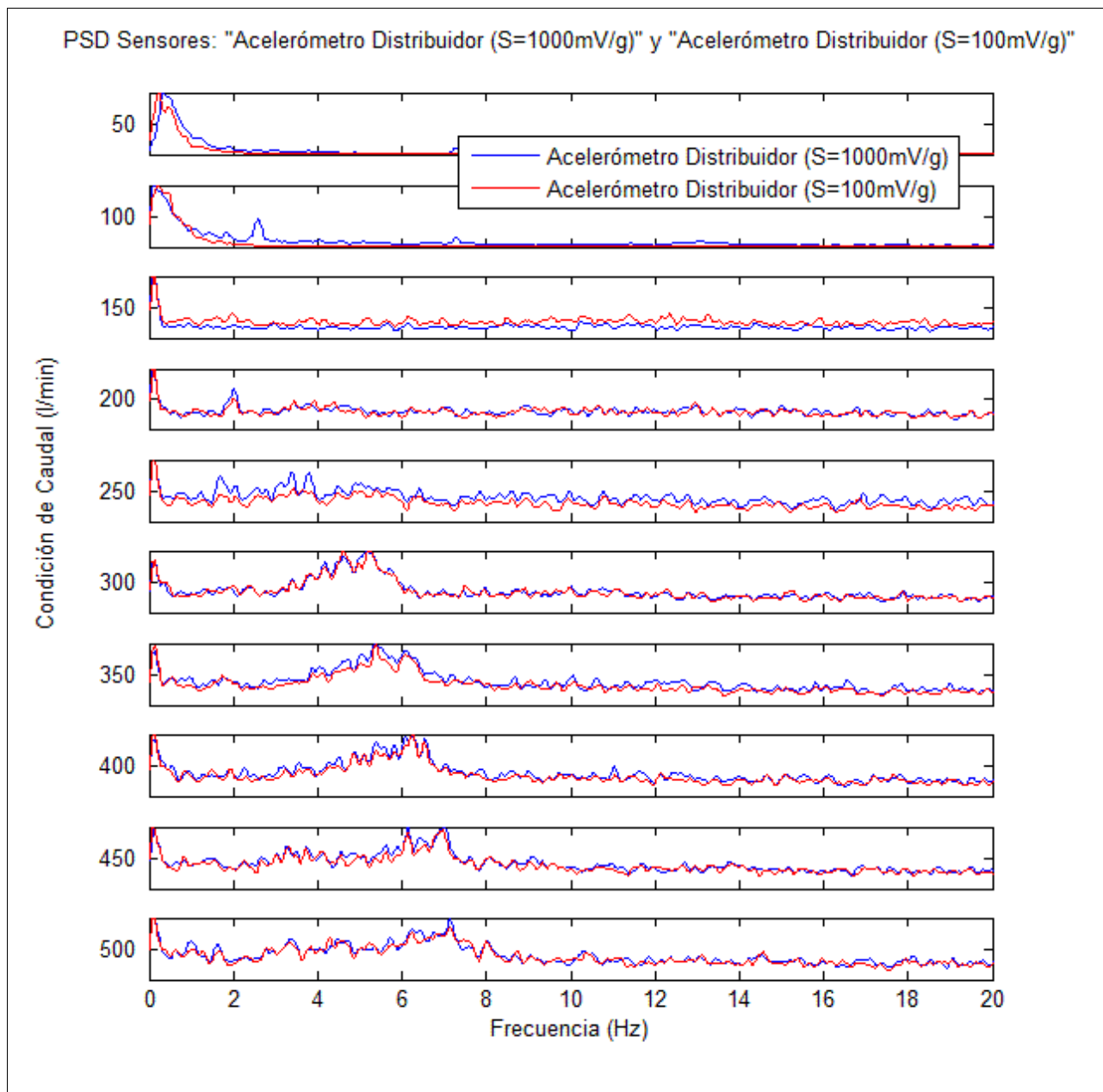


Figura 7.2.3.- PSD. Sensores: Acelerómetros Distribuidor. Altura del lecho: 160mm.-

7.3- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

De los resultados obtenidos en todas las pruebas realizadas en el lecho de 160mm de altura, y comparándolos con los resultados obtenidos con el lecho de 70mm, se puede realizar el siguiente análisis:

- ✧ En las condiciones de 50 y 100 l/min, en las que no existe fluidización, los resultados son similares a los obtenidos con el lecho de 70mm.
- ✧ En la condición de 150 l/min, correspondiente a fluidización incipiente, no se distinguen frecuencias características en ningún sensor, al contrario que ocurre con el lecho de 70mm. Esto puede deberse a que las condiciones de generación de las burbujas son diferentes en ambos casos.
- ✧ En las condiciones de caudal superior a 150 l/min, las PSD correspondientes a los sensores de presión y los sensores de vibración en el lecho, muestran picos situados entre 1 y 2Hz. La frecuencia característica ha bajado considerablemente respecto a los resultados del lecho de 70mm. Además, se aprecia una disminución progresiva de dicha frecuencia a medida que aumenta el caudal, desde 2 hasta 1Hz.
- ✧ Los sensores de vibración situados en el distribuidor, no muestran ningún pico en el rango de frecuencias comprendido entre 1 y 2Hz. Las frecuencias más altas están alrededor de 6Hz y no se aprecian picos definidos.

Con el propósito de comparar visualmente los resultados obtenidos con los diferentes sensores, se han seleccionado tres velocidades del aire, que corresponden a las tres condiciones de fluidización que presenta el lecho durante las pruebas. Estas condiciones son las siguientes:

- ✧ 0,43 m/s (100 l/min.): Sin fluidización.
- ✧ 1,08 m/s (250 l/min.): Fluidización con burbuja estrecha.
- ✧ 1,95 m/s (450 l/min.): Fluidización con burbuja gruesa con cierta fluidización turbulenta.

En las siguientes figuras se muestran, para cada una de las condiciones mencionadas anteriormente, tres gráficos: En el primero se representan los sensores de presión. En el segundo se representan los sensores de vibración en el lecho. Y en el tercero se representan los sensores de vibración en el distribuidor, en dirección vertical.

Condición: Velocidad del aire: 0,43 m/s. Caudal: 100 l/min.:

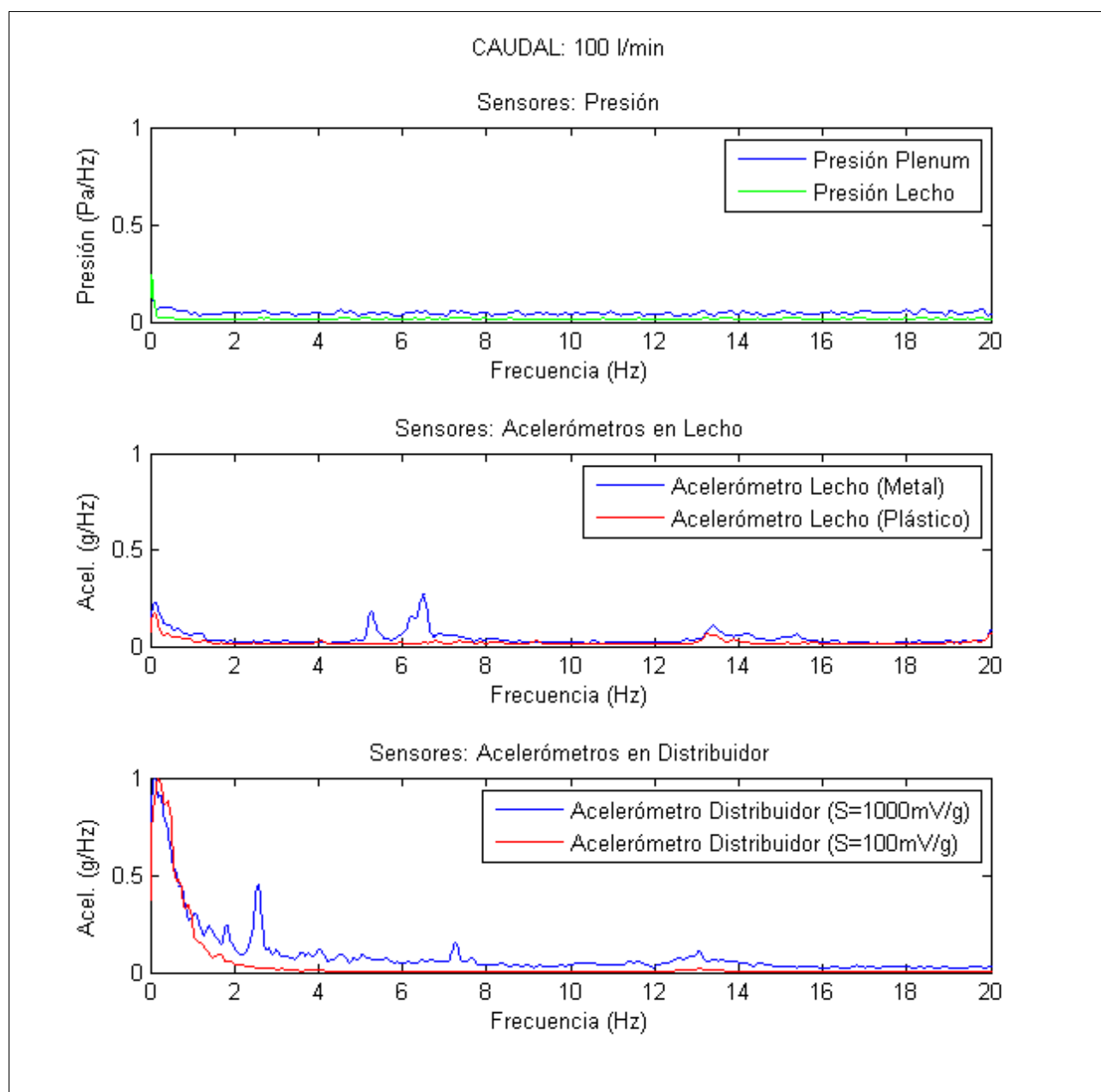


Figura 7.3.1.- Condición de caudal: 100 l/min. (Sin fluidización).-

Condición: Velocidad del aire: 1,08 m/s. Caudal: 250 l/min.:

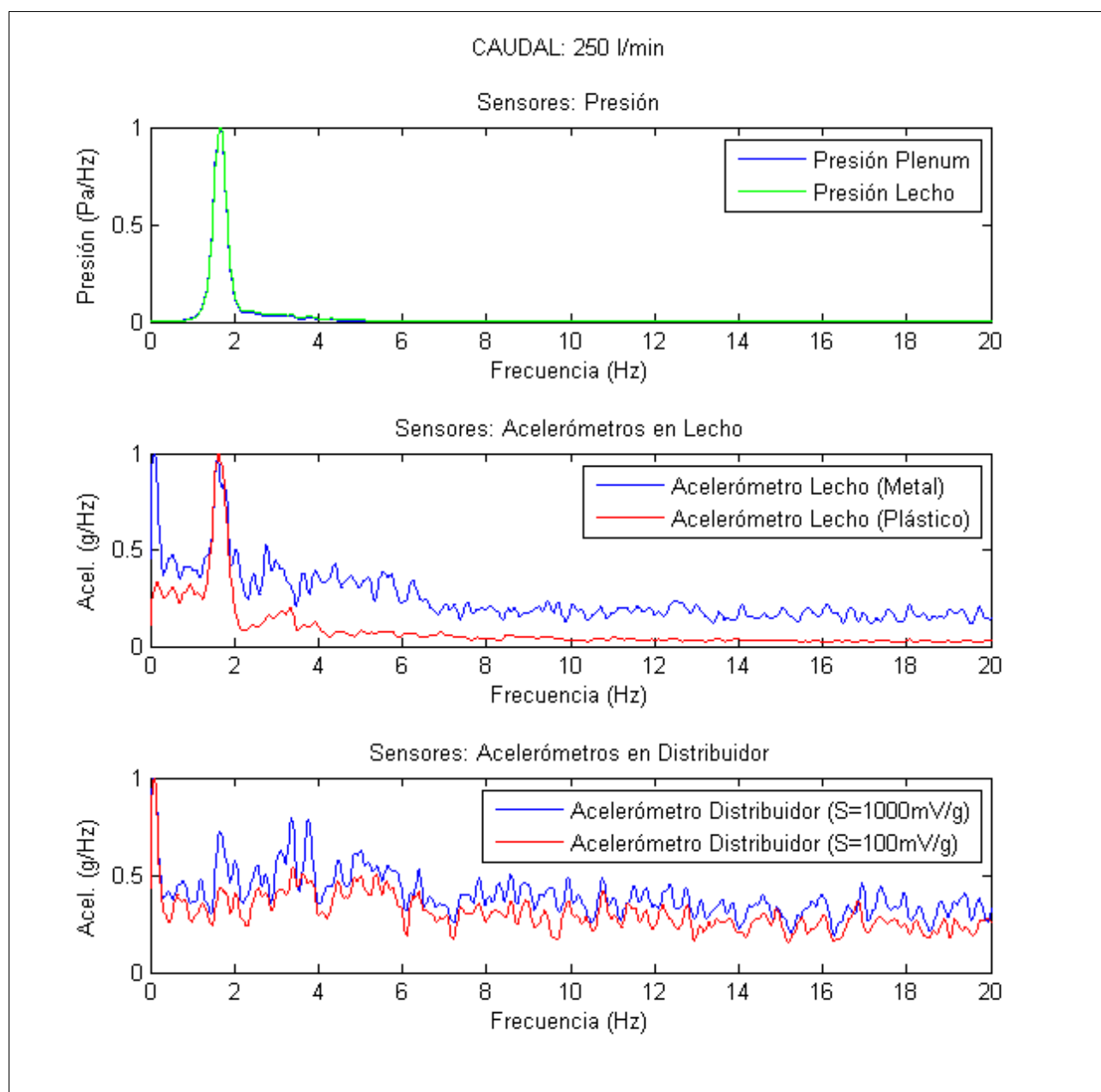


Figura 7.3.2.- Condición de caudal: 250 l/min. (Fluidización con burbuja estrecha).-

Condición: Velocidad del aire: 1,95 m/s. Caudal: 450 l/min.:

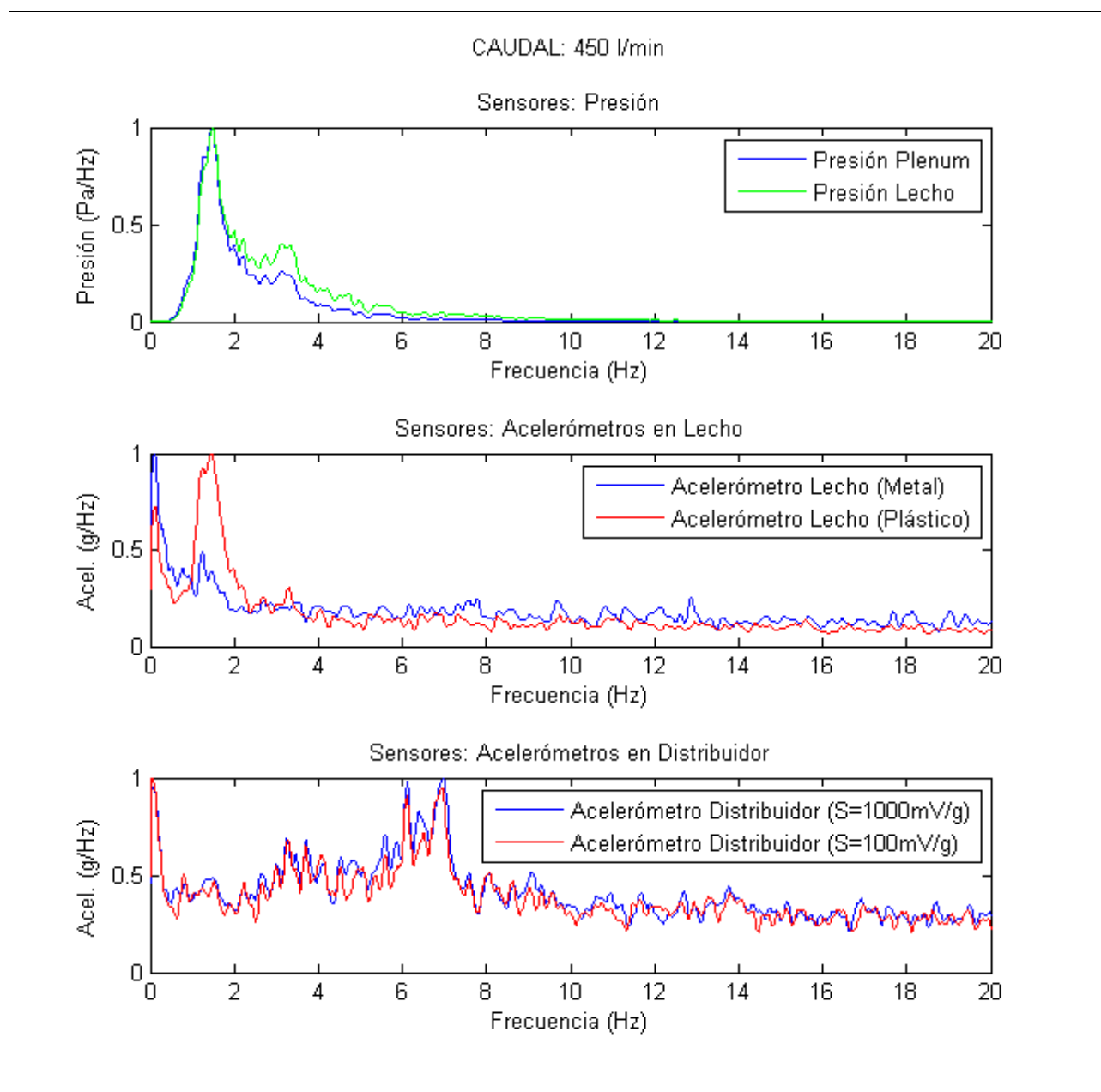


Figura 7.3.3.- Condición de caudal: 450 l/min. (Fluidización con burbuja gruesa).-

7.4- CONCLUSIONES:

A partir de todos los datos expuestos en el apartado 7 (“Resultados obtenidos en las medidas en lecho de 160mm de altura”), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ✧ Al igual que en el lecho de 70mm, se puede apreciar la existencia de ruido estructural, más acentuado en los sensores situados en el distribuidor.
- ✧ Las medidas de todos los sensores, realizadas con 150 l/min de caudal, muestran resultados que no se corresponden ni con un lecho en reposo ni con un lecho burbujeante. En el lecho de 70mm ya existen indicios de burbujeo. La teoría dice que la velocidad mínima de fluidización no cambia con la altura del lecho (Van der Schaaf, 2004). Por ello, los resultados obtenidos se deben interpretar como una fluidización homogénea, con un burbujeo pequeño e irregular, que genera variaciones de presión y vibraciones que no siguen ningún patrón de frecuencias.
- ✧ Las medidas realizadas en condiciones de caudal por encima de 150 l/min, con los sensores de presión y vibración en el lecho, dan como resultado unas frecuencias características de menores. Esta apreciación es coherente con los estudios realizados por J. van der Schaaf (2004), en los que se relaciona la altura del lecho con la frecuencia característica en los espectros de presión.
- ✧ Los sensores de vibración situados en el lecho (orientación horizontal) proporcionan resultados muy similares a los obtenidos con los sensores de presión. En ambos casos, los espectros tienen menos ruido y reflejan frecuencias características mejor definidas que los obtenidos con el lecho de 70mm. Esto se debe a que la mayor cantidad de material en el lecho (mayor altura) produce fluctuaciones mayores, y por tanto, señales de mayor calidad.
- ✧ En los espectros de los sensores de presión y de vibración en el lecho (orientación horizontal), se aprecia un descenso paulatino de la frecuencia característica, proporcional a la velocidad del aire. Este fenómeno ya es conocido (De Martín, 2010). La importancia de esta apreciación reside en el hecho de que las frecuencias características están suficientemente definidas como para detectar un cambio en la condición de caudal. La capacidad del sistema de monitorización para distinguir entre diferentes condiciones de funcionamiento, es el objeto fundamental de este proyecto. En cambio, los resultados de las medidas sobre el lecho de 70mm, no permiten realizar esta distinción.
- ✧ En los espectros de los sensores de vibración en el distribuidor (orientación vertical) no permiten distinguir ninguna frecuencia característica relacionada con las medidas de presión. Tampoco es posible relacionar los diferentes espectros con las condiciones de medida a través de otras componentes diferentes a las que muestran los sensores de presión. Los resultados obtenidos mediante estos sensores no son positivos para relacionarlos con la frecuencia dominante del sistema. Sin embargo, estas medidas permiten detectar cambios de caudal con frecuencias en torno a 4-6Hz para ambas alturas.
- ✧ De la misma forma que ocurre en el lecho de 70mm, el análisis de las medidas de vibración sin aplicar la transformada de Hilbert, dan como resultado espectros no válidos para el propósito de este proyecto.

8.- CONCLUSIONES:

A lo largo de la ejecución de las pruebas previstas en este proyecto y, tras haber finalizado el análisis de los datos obtenidos en dichas pruebas, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- ⤴ En la mayor parte de los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia existen componentes de baja frecuencia, que dificultan el análisis de los resultados. Como se ha dicho antes, estas componentes están asociadas al ruido estructural, es decir, al movimiento del conjunto del reactor. La manera de eliminar este ruido es aplicar un filtro paso alto. Basándose en otros estudios (De Martín, 2010), se decidió, durante la fase de determinación de las condiciones de medida, utilizar un filtro paso-alto de 0,16Hz. El análisis de los resultados finales pone de manifiesto que la frecuencia de corte de este filtro es insuficiente para eliminar este ruido. La alternativa que existe para tratar de reducir el ruido estructural, es modificar la rigidez del reactor, utilizando un tipo de anclajes a la estructura diferentes a los utilizados en este proyecto.
- ⤴ El reactor se ha monitorizado con dos alturas del lecho: 70 y 160mm. En el lecho de 160mm es posible relacionar la velocidad del aire con las frecuencias características de los espectros obtenidos por los sensores de presión y por los sensores de vibración colocados en el lecho en dirección horizontal. Por ello, se considera que los mejores resultados corresponden al lecho de 160mm.
- ⤴ A lo largo de todas las pruebas se han registrado mediciones de presión en dos puntos: plenum y lecho. Todas las medidas en estos dos puntos dan el mismo resultado, por lo que se puede prescindir de uno de ellos.
- ⤴ En términos generales, el sensor de vibración que es capaz de obtener una señal más parecida a los sensores de presión y, por lo tanto, el que proporciona mejores resultados es el situado en el lecho y colocado sobre la pieza de poli-metil-metacrilato.
- ⤴ Los sensores de vibración situados en el distribuidor, en dirección vertical, no ofrecen resultados positivos para el objeto de este proyecto. Estos dos sensores tienen sensibilidades diferentes (100 y 1000mV/g). En ambos casos, los resultados son muy similares.

Conclusiones finales:

- ⤴ El objetivo fundamental de este proyecto es comprobar la viabilidad de utilizar sensores de vibración para monitorizar un reactor químico, de la misma manera que lo pueden hacer los sensores de presión. Después de la pruebas realizadas, se puede afirmar que es posible monitorizar el reactor con acelerómetros. Ahora bien, como se ha podido comprobar, la lectura de los acelerómetros varía considerablemente. La obtención de resultados positivos está condicionada a la correcta posición y dirección de los sensores, y a unas apropiadas condiciones del lecho. En este reactor, la posición más adecuada para la medida de vibración es la zona inferior del lecho, sobre la pieza de poli-metil-metacrilato, y la dirección de medida es la horizontal. Las condiciones del lecho más apropiadas son las definidas en el punto 5.5. La altura del lecho tiene una influencia importante, siendo la de 160mm la más adecuada.

- ✦ El análisis en el dominio del tiempo concluye que los valores de las desviaciones típicas en presión y en vibración siguen la misma evolución, a lo largo de las diferentes condiciones de velocidad del aire. Ello sucede en los dos lechos monitorizados (70 y 160mm de altura) y con todos los sensores utilizados. Por tanto, en el caso de realizar una monitorización que se limite al análisis en el dominio del tiempo o calcular la velocidad de mínima fluidización, cualquiera de los sensores de vibración utilizados podría sustituir a los sensores de presión.

BIBLIOGRAFÍA:

- ♣ Allen, R.L., Mills, D.W. (2003). *Signal Analysis: Time, Frequency, Scale and Structure*.
- ♣ De Martín, L., Villa Briongos, J., Aragón, J.M., Palancar, M.C. (2010). Can low frequency accelerometry replace pressure measurements for monitoring gas-solid fluidized beds? *Chemical Engineering Science*.
- ♣ De Martín, L., Villa Briongos, J., García-Hernando, N., Aragón, J.M. (2010). Detecting regime transitions in gas-solid fluidized beds from low frequency accelerometry signals. *Powder Technology*.
- ♣ Johnsson, F., Zijerveld, R.C., Schouten, J.C., van den Bleek, C.M., Leckner, B. (2000). Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*.
- ♣ Kage, H., Agari, M., Ogura, H., Matsuno, Y. (2000). Frequency analysis of pressure fluctuation in fluidized bed plenum and its confidence limit for detection of various modes of fluidization. *Advanced Powder Technology*.
- ♣ Kunii, D., Levenspiel, O. (1991). *Fluidization Engineering*. Stoneham: Butterworth-Heinemann.
- ♣ Van der Schaaf, J., van Ommen, J.R., Takens, F., Schouten, J.C., van den Bleek, C.M. (2004). Similarity between chaos analysis and frequency analysis of pressure fluctuations in fluidized beds. *Chemical Engineering Science*.
- ♣ Van Ommen, J.R., Sasic, S., van der Schaaf, J., Gheorrghiu, S., Johnsson, F., Coppens, M.O. (2010). Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds – A review. *International Journal of Multiphase Flow*.
- ♣ Welch, P.D., (1967). "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms", *IEEE Transactions on Audio Electroacoustics*.
- ♣ Wilkinson, D. (1995). Determination of minimum fluidization Velocity by pressure fluctuation measurement. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*.